



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



ESTUDI DELS PARÀMETRES DEL PROCÉS DE MICROMOLDEIG PER ULTRASON MITJANÇANT DISSENY EXPERIMENTAL

MEMÒRIA

Autor: David Montes Cobo

Tutor UPC: Jasmina Casals Terre

Tutor Eurecat: Marcel Janer Angelet

Treball Final de Màster-MUEI

ESEIAAT-Desembre 2016

Taula de contingut

1. Objecte	1
2. Abast	1
3. Requeriments i especificacions bàsiques	1
4. Justificació	2
5. Estat de l'art.....	3
5.1 Aplicació industrial dels ultrasons d'alta potencia en líquids	3
5.2 Soldadura de plàstic per ultrasons.....	6
5.3 Microinjecció.....	7
5.4 Micromoldeig per Ultrasons (USM)	8
6. Teoria: Disseny Experimental	13
6.1 Estudi dels residus	14
6.2 Estudi de la significació del model	16
6.3 Codificació del model i construcció de la superfície de resposta.....	18
7. Estructura dels experiments	20
8. Experiments realitzats	25
8.1 DoE 1: Influència de l'amplitud de vibració	25
8.2 DoE 2: Influència de l'amplitud i la velocitat d'injecció.....	36
8.3 DoE 3: Influència del motlle	47
8.4 DoE 4: Influència de la massa de dosificació	53
8.5 DoE 5: Influència del volum de pellet.....	56
8.6 DoE 6: Influència del mètode d'injecció	59
8.7 DoE 7: Influència de la secció d'entrada i de la temperatura del motlle	65
8.8 Relació màxim temperatura vs. dispersió relativa	68
9. Conclusions dels experiments	73
9.1 Conclusions DoE 1	73
9.2 Conclusions DoE 2	73
9.3 Conclusions DoE 3	74
9.4 Conclusions DoE 4	75
9.5 Conclusions DoE 5	75
9.6 Conclusions DoE 6	76

9.7	Conclusions DoE 7	76
9.8	Taules resum conclusions	77
10.	Propers passos	85
11.	Agraïments.....	85
12.	Bibliografia	86

Taula d'il·lustracions

Figura 1: Publicacions en l'àmbit dels ultrasons d'alta potència [8]	4
Figura 2: Patents industrial en l'àmbit dels ultrasons d'alta potència [8]	4
Figura 3: Fenòmen de cavitació en fluids Newtonians i no Newtonians [9]	5
Figura 4: Esquema del funcionament d'una unitat de soldadura per ultrasons [10]	6
Figura 5: Esquema microinjectora [Chu: Characterization of the microinjection molding process].....	7
Figura 6: Sonorus 1G	9
Figura 7: Esquema components Sonorus	10
Figura 8: Etapes del procés USM. Font: University of Bradford	10
Figura 9: Tensions internes en una lent, estudiades pel mètode de birefringència (esquerra microinjecció convencional, dreta USM [13])	11
Figura 10: Residu d'una mostra experimental normal	14
Figura 11: Ajust normal dels residus	15
Figura 12: Residus amb variància constant (esquerra) i amb variància no constant (dreta).....	16
Figura 13: Distribució probabilística F o de Snedecor	17
Figura 14: Distribució probabilística T o de Student	18
Figura 15: Exemple superfície de resposta	19
Figura 16: Configuracions de motlle utilitzades	20
Figura 17: Recollida de dades de la màquina en un cicle d'injecció	20
Figura 18: Recollida de dades del sensor en un cicle d'injecció	21
Figura 109: Obtenció de la matriu de respostes.....	21
Figura 20: Estructura funcions d'adquisició de dades	22
Figura 21: Estructura funcions de tractament de dades	23
Figura 22: Estructura funcions d'organització de dades	24
Figura 23: Mitjana T2 vs A (dades experimentals)	26
Figura 24: Màxim T2 vs A (dades experimentals)	27
Figura 24: Distribució normal del punts experimentals (Mitjana T2)	27
Figura 25: : Distribució normal del punts experimentals (Mitjana T2)	27
Figura 26: Residus vs resposta estimada (Mitjana T2)	28
Figura 2711: Residus vs Amplitud (Mitjana T2).....	28
Figura 28: Ajust normal dels residus (Mitjana T2)	29
Figura 29: Resposta Mitjana T2 en funció de X1 codificada.....	30
Figura 30: Resposta Mitjana T2 en funció de A [%]	31
Figura 3112: Resposta Mitjana T2 en funció de A [micres]	31
Figura 32: Residus vs resposta estimada (Màxim T2)	32
Figura 33: Residus vs Amplitud (Màxim T2).....	32

Figura 34: Ajust normal dels residus (màxim T2)	33
Figura 35: Màxim T2 vs X1 codificada	34
Figura 36: Màxim T2 vs Amplitud [%].....	35
Figura 37: Màxim T2 vs Amplitud [micres]	35
Figura 38: Mitjana T2 vs A (dades experimentals)	37
Figura 39: Mitjana T2 vs V (dades experimentals)	37
Figura 40: Màxim T2 vs A (dades experimentals)	37
Figura 41: Màxim T2 vs V (dades esxperimentals)	38
Figura 42: Distribució normal dels punts experimentals (Mitjana T2)	38
.....	38
Figura 43: Distribució normal dels punts experimentals (Màxim T2)	38
Figura 44: Residus vs resposta estimada (Mitjana T2)	39
Figura 45: Residus vs Amplitud (Mitjana T2).....	39
Figura 46: Residus vs Velocitat (Mitjana T2).....	40
Figura 47: Ajust normal dels residus (Mitjana T2)	40
Figura 48: Superfície de resposta (Mitjana T2)	41
Figura 49: Superfície de resposta descodificada (Mitjana T2).....	42
Figura 50: Superfície de resposta descodificada amb A en micres (mitjana T2)	42
Figura 51: Residus vs resposta estimada (Màxim T2)	43
Figura 52: Residus vs Amplitud (Màxim T2).....	43
Figura 53: Residus vs Velocitat (Màxim T2).....	43
.....	44
Figura 54: Ajust normal dels residus (Màxim T2)	44
.....	45
Figura 55: Superfície de resposta (Màxim T2)	45
Figura 56: Superfície de resposta descodificada (Màxim T2).....	46
Figura 57: Superfície de resposta descodificada amb A en micres (Màxim T2)	46
Figura 58: Màxim T2 vs A	48
.....	48
Figura 59: Màxim T2 vs V	48
Figura 60: Distribució normal dels punts experimentals	49
Figura 61: Residus vs resposta estimada	49
Figura 62: Residus vs Amplitud	50
Figura 63: Residus vs Velocitat.....	50
.....	50
Figura 64: Ajust normal dels residus	50
.....	50
Figura 65: Superfície de resposta	52
Figura 66: Superfície de resposta descodificada	52
Figura 67: Superfície de resposta descodificada amb A en micres	53
.....	54

Figura 68: Distribució normal dels punts experimentals (Màxim T2)	54
Figura 69: Distribució normal dels punts experimentals (Pes).....	55
Figura 70: Temperatura Màxima vs Massa de dosificació.....	55
Figura 71: Relació entre la massa dosificada i la integral de la força de la màquina	56
Figura 72: Distribució normal dels punts experimentals	58
Figura 73: Temperatura màxima vs Dimensió de pellet	59
Figura 74: Màxim T2 vs A	60
Figura 75: Màxim T2 vs F	61
Figura 76: Distribució normal dels punts experimentals	61
Figura 77: Residus vs resposta estimada	62
Figura 78: Residus vs Amplitud	62
Figura 79: Residus vs Força	62
Figura 80: Distribució normal dels residus	63
Figura 81: Superfície de resposta	64
Figura 82: Valors experimentals amb entrada oberta i semioberta	66
Figura 83: Temperatura màxima a cada cicle d'injecció	66
Figura 84: Distribució normal dels punts experimentals	67
Figura 85: Desviació estàndar relativa a la mitjana del màxim de temperatura ..	70
.....	70
Figura 86: Desviació estàndar relativa a la mitjana del màxim de temperatura ..	70
Figura 87: Desviació estàndar relativa a la mitjana del màxim de temperatura ..	71
Figura 88: Desviació estàndar relativa a la mitjana del màxim de temperatura ..	71
Figura 89: Desviació estàndar relativa a la mitjana del màxim de temperatura ..	71
Figura 90: Evolució Màxim Temperatura vs Volum de pellet.....	76

1. Objecte

L'objectiu d'aquest estudi és valorar com afecten els paràmetres del procés de micromoldeig per ultrasons (USM) a les diferents respostes que es poden mesurar, tant del procés com de la peça obtinguda. A partir d'una primera avaluació dels paràmetres significatius de procés, s'ha decidit estudiar la variabilitat de la temperatura d'injecció en funció dels paràmetres d'entrada.

L'estudi pretén fixar una base per poder entendre les conseqüències que poden tenir les diferents configuracions que permet el procés, abans de realitzar el cicle d'injecció, i així facilitar l'obtenció d'una correcta configuració de procés per a un material i peça concrets.

2. Abast

L'estudi contemplarà els següents punts:

- Definició dels principals paràmetres de control del procés de micromoldeig per ultrasons.
- Definició de les respostes que es poden mesurar del procés, per tal de valorar l'afectació dels paràmetres.
- Estudiar l'afectació dels diferents paràmetres de control respecte les respostes mesurades, a partir de la realització de diversos dissenys d'experiments.
- Amb les conclusions dels primers experiments, aprofundir en l'estudi dels paràmetres que semblen tenir més efecte.

3. Requeriments i especificacions bàsiques

- L'estudi es realitzarà a la fundació Eurecat, en col·laboració amb l'empresa Ultrason, propietària de la patent de la màquina d'injecció per ultrasons.
- La màquina a utilitzar és la SONORUS 1G. Algunes de les especificacions tècniques es poden trobar a l'annex.

- Per l'obtenció de dades, s'utilitzarà un equip d'adquisició de dades de la marca Kistler, Model COMO 5865B1 SN1848332. Datasheet a l'annex.
- El sensor utilitzat és un infraroig de temperatura i pressió, de la marca FOS i fabricat sota comanda. Datasheet a l'annex.
- L'adquisició de les dades es farà en temps real i amb el software COMO Datacenter, proporcionat per Kistler, a través de connexió ethernet al PC.
- Les dades es tractaran amb Matlab i Excel.
- El material a utilitzar en els experiments és polipropilè. S'utilitzaran tres tipus: PP Eltex MED 100-MG03, PP Moplen RP348R i PP Hostacom PPU X9067HS. Datasheets a l'annex.

4. Justificació

Ultrason, l'empresa spin-off del Centre Tecnològic Eurecat, ha desenvolupat una innovadora màquina de microinjecció (Sonus), basada en el principi de vibració mecànica ultrasònica, com a font de calor per fondre material plàstic i injectar-ho a motlles de micropeces. Aquesta metodologia permet injectar just la quantitat necessària de material, al no tenir fuset, i per tant es pot arribar a estalviar fins a un 90% de material versus el procediment de microinjecció convencional.

Es per això que és necessari un estudi en profunditat d'aquest procés, sobretot de com afecten els principals paràmetres de configuració de la màquina a la qualitat de les peces obtingudes, com la temperatura d'injecció a la que s'arriba, la pressió necessària per injectar, o la repetibilitat del procés.

5. Estat de l'art

5.1 Aplicació industrial dels ultrasons d'alta potència en líquids

L'aplicació dels ultrasons d'alta potència en processos industrials, utilitzats en materials en estat líquid, té el seu origen als anys 50, quan es va descobrir que l'aplicació estàtica d'ultrasons tenia efectes reològics al material plàstic, els quals provocaven una disminució de la seva viscositat.

Els primer estudis que es van fer amb ultrasons d'alta potència van ser en fluids Newtonians, en els quals els efectes resultants observats van ser atribuïts al fenomen de cavitació. Un dels primers estudis en fluids no Newtonians va ser publicat per Bernhardt [1], el qual va ser pioner en introduir la tecnologia d'ultrasons en plàstic fos, observant un increment de la temperatura i una variació en la viscositat en funció de la freqüència de vibració aplicada.

La primera aplicació industrial va ser la seva incorporació al procés d'extrusió, millorant la processabilitat al augmentar la fluïdesa del material [1]. Als anys 60, es va registrar les primeres patent industrial del procés d'extrusió assistit amb ultrasons [2] [3], a partir d'on van sorgir diverses aplicacions alternatives per als processos d'extrusió, com extrusió d'espumes termoplàstiques [4], o dispersió de partícules en materials compostos [5]

Des d'aleshores, s'han realitzat alguns estudis (principalment en l'última dècada) per aprofundir no només en les aplicacions d'aquest procés, sinó en els principis físics de funcionament, i avui dia encara hi ha una considerable mancança de coneixement complert que afecta en gran mesura a la consolidació d'aquesta tecnologia per a la transformació del plàstic.

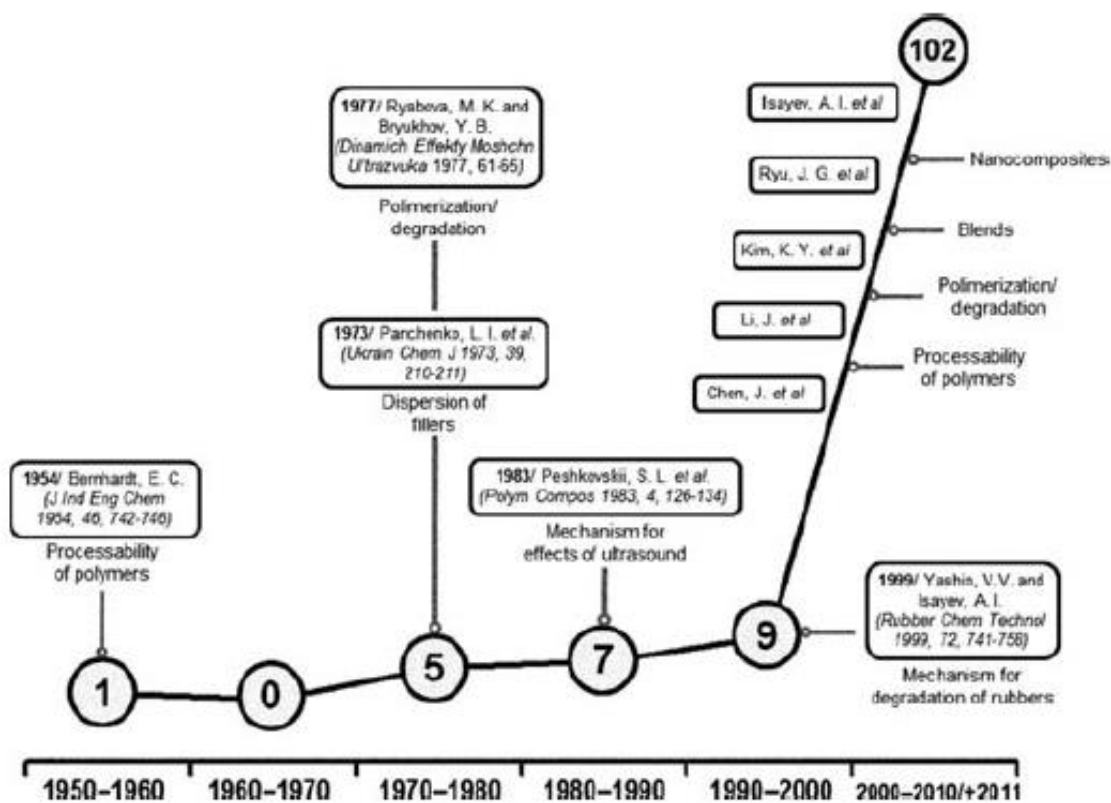


Figura 1: Publicacions en l'àmbit dels ultrasons d'alta potència [8]

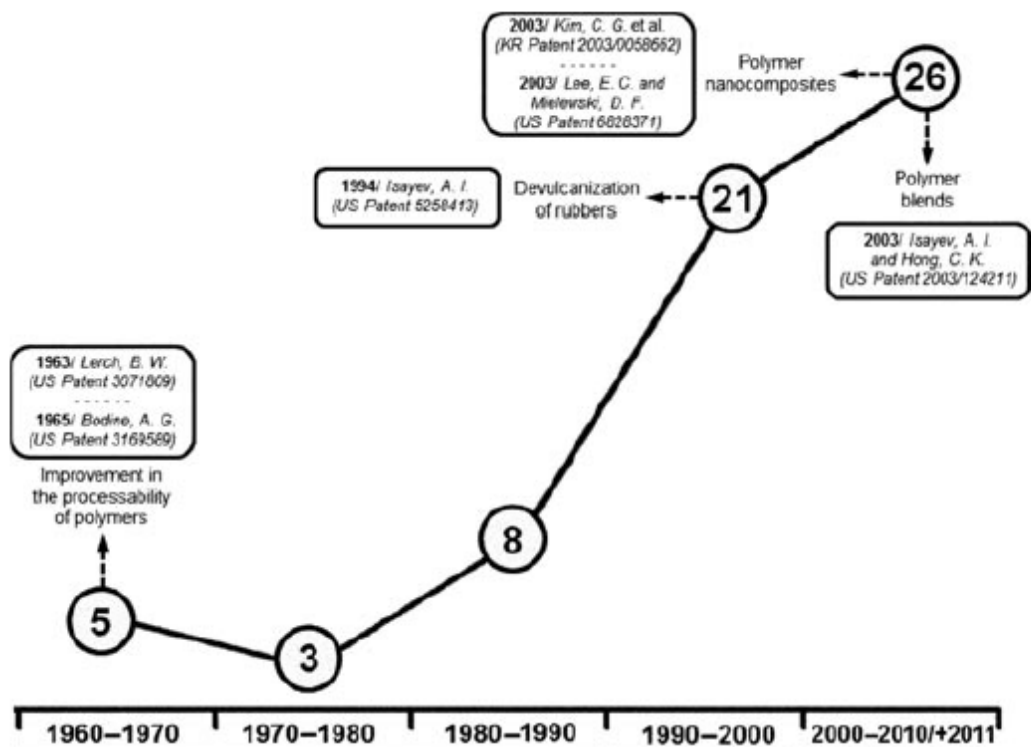


Figura 2: Patents industrial en l'àmbit dels ultrasons d'alta potència [8]

A partir dels anys 80 les investigacions van aprofundir en els aspectes mecànics de la transmissió de la vibració ultrasònica, tan en sistemes Newtonians com no Newtonians, descrivint per primer cop els efectes fisicoquímics associats als ultrasons (sonochemistry), [6] com a resultat de les ones de xoc derivades de la implosió de les bombolles produïdes pel fenomen de cavitació.

S'ha de tenir en compte que aquest fenomen ha estat en entredit per diversos autors, ja que en fluids no-Newtonians, les bombolles tendrien a deformar-se sense implosionar, o bé implosionant de manera suau, alliberant poca pressió en el procés. Tot i així, la reducció en la viscositat del fluid, provocada per la vibració ultrasònica, sí que podria induir a una implosió de les bombolles que produiria aquestes ones de xoc, quan amb la viscositat pròpia del material fos no hagués estat possible.

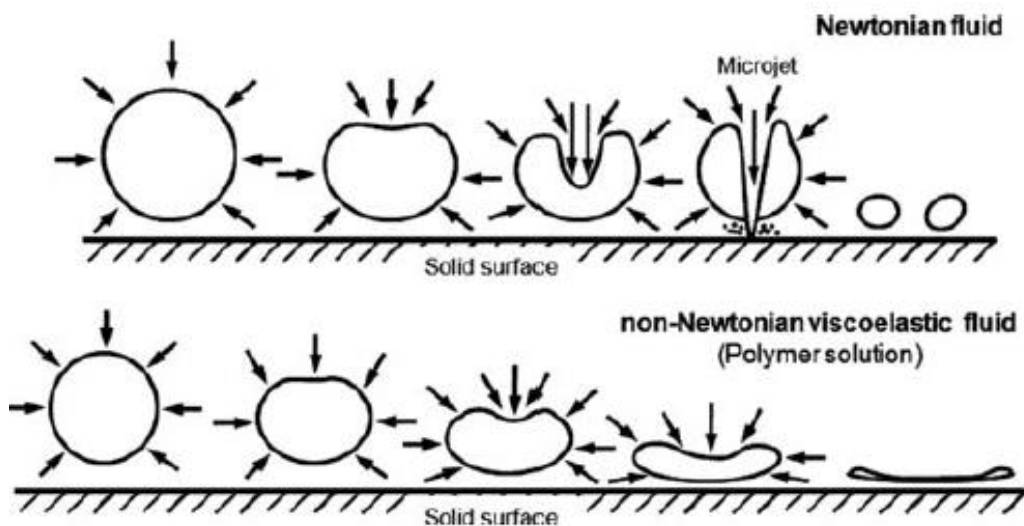


Figura 3: Fenòmen de cavitació en fluids Newtonians i no Newtonians [9]

A part de l'efecte de la cavitació, el qual no està resolt si afecta en poca o molta mesura als fluids no Newtonians, tant l'efecte viscoelàstic com la fricció interna de les cadenes de polímer s'han de tenir en compte com dos paràmetres d'igual o més rellevància que la cavitació [7].

Tots aquests estudis sobre la vibració per ultrasons d'alta potència han derivat en diverses aplicacions industrials. Les més extenses, en l'àmbit de la transformació de materials plàstics, han sigut: la devulcanització d'elastòmers, la compatibilització de mescles immiscibles, la dispersió de nanopartícules en elements compostos, i més recentment el micromoldeig per ultrasons.

L'objecte del present estudi, el micromoldeig per ultrasons (USM), es basa en la combinació de les tecnologies de la soldadura per ultrasons i el procés de microinjecció convencional.

5.2 Soldadura de plàstic per ultrasons

El procés de soldadura de plàstic per ultrasons és un dels mètodes de soldadura més utilitzats industrialment. Es basa en la unió de dues peces plàstiques mitjançant una vibració mecànica ultrasònica (veure figura 4). La vibració es subministra mitjançant un sonotrode (element nº3) que es troba en contacte amb una de les peces a soldar (element nº4). Aquesta vibració es transmet a través de la peça fins a la superfície d'unió que es vol soldar (element A).

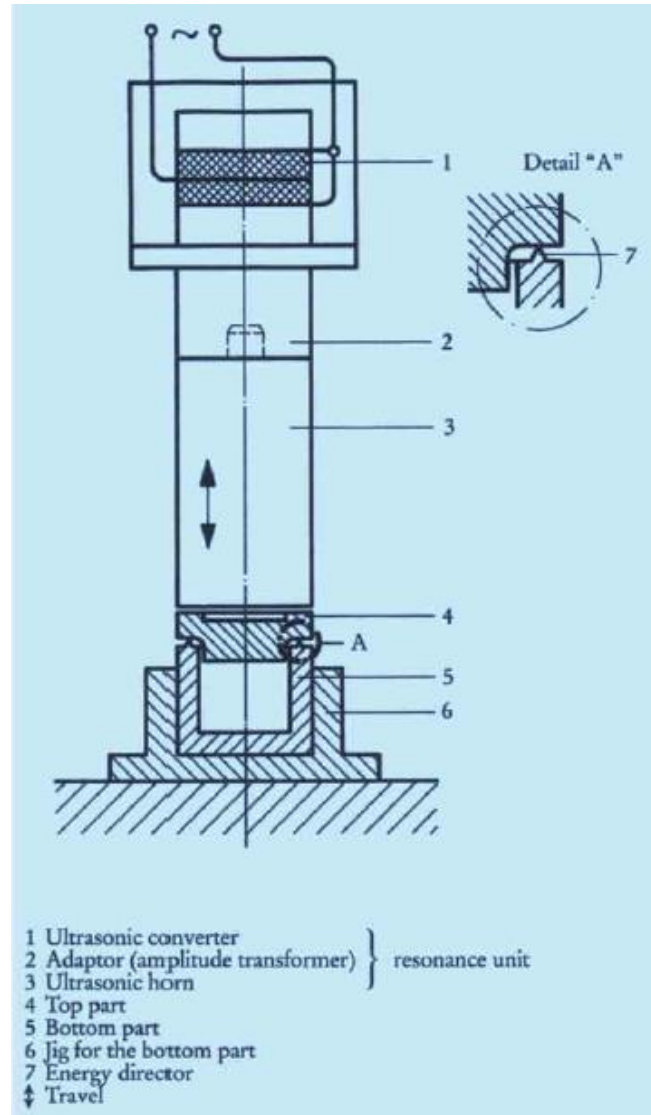


Figura 4: Esquema del funcionament d'una unitat de soldadura per ultrasons [10]

El principi operatiu és el següent: el transductor consta d'una sèrie de cristalls piezoelèctrics que es contrauen i expandeixen amb cada cicle altern del generador (que sol operar a freqüències d'entre 20 kHz i 50 kHz). Aquestes vibracions es

transmeten mecànicament a través del booster (amplificador) fins a un sonotrode, la punta del qual proporciona l'amplitud desitjada. Tot el conjunt (unitat de ressonància), està dissenyat perquè la freqüència de ressonància coincideixi amb la del transductor, d'aquesta manera s'aconsegueix la vibració amb el mínim consum de potència.

Per dur a terme la soldadura, s'ha de dissenyar acuradament les juntes entre les peces, amb els directors d'energia apropiats, per aconseguir una soldadura homogènia¹.

Quan s'utilitza en termoplàstics, la interfície de la junta arriba a la temperatura de fusió, resultant en una soldadura d'alta resistència en la que la unió es troba en tota la superfície a soldar.

Es sol utilitzar en ocasions on els sistemes de soldadura més convencionals resultessin en un consum de temps excessiu (aquesta tecnologia permet soldar en menys d'un segon), o en unions de materials dissimilars.

5.3 Microinjecció

La microinjecció es tracta d'un procés de transformació de termoplàstics, basat en una reducció escalada del sistema d'injecció convencional, per a fabricar peces de dimensions reduïdes que no es podrien obtenir amb injectores convencionals.

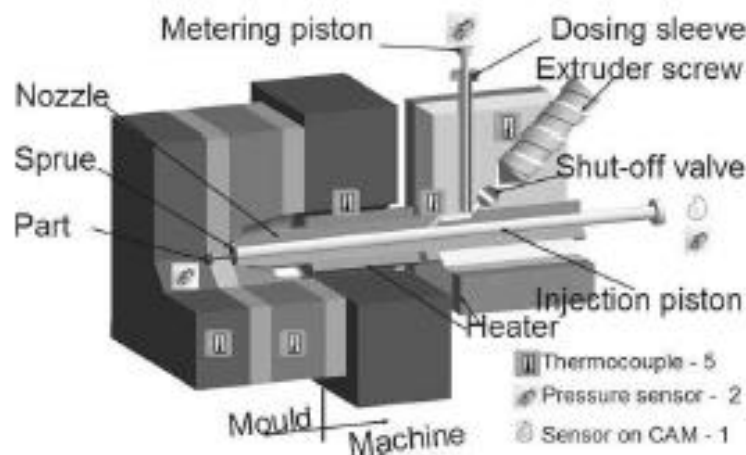


Figura 5: Esquema microinjectora [Chu: Characterization of the microinjection molding process]

¹ Veure "Detall A" de la Figura 4.

Per marcar una frontera clara entre la microinjecció i la injecció convencional, es poden definir tres característiques principals que definirien una peça a fabricar per microinjecció [11]:

- 1) La massa de la peça és, com a molt, de l'ordre de mil·ligrams.
- 2) La peça conté toleràncies en el rang micromètric.
- 3) La peça conté detalls de dimensions micromètriques.

El procés d'injecció convencional manca de l'alta precisió que requereixen les peces amb les característiques descrites, a més de tenir problemes de degradació de material en el fuset, degut al poc volum injectat a cada cicle i el conseqüent l'alt temps de residència del material a la unitat d'injecció.

És per això que les màquines de microinjecció, tot i basar-se en un disseny escalat d'una màquina d'injecció convencional, tenen millores en quant al volum plastificat al fuset, així com la homogeneïtat de la mescla, la sensibilitat en la mesura de les dosificacions de material i una velocitat d'injecció superior, per tal d'evitar refredaments prematurs degut a l'elevat rati superfície/volum de la peça.

5.4 Micromoldeig per Ultrasons (USM)

Els primers estudis sobre el procés de micromoldeig per ultrasons (USM) els va publicar Walter Michaeli [12], on amb una premsa de soldadura d'ultrasons convencional y un motlle col·locat a l'extrem, va fer diverses proves experimentals injectant pellets, fosos directament per la vibració del sonotrode i controlant la pressió exercida per aquest.

En paral·lel, la fundació privada ASCAMM² va obrir una línia d'investigació sobre aquest procés, desenvolupant la patent d'una màquina d'injecció per ultrasons (SONORUS), i creant una empresa spin-off que es dediqués a comercialitzar-la i a continuar desenvolupant i millorant aquesta tecnologia (Ultrason).

² Integrada ara al centre tecnològic Eurecat.



Figura 6: Sonorus 1G

Aquesta màquina funciona amb el mateix principi que la premsa de soldadura per ultrasons, incorporant un motlle de microinjecció a la part inferior.

El transductor és excitat per un generador, de 20kHz o de 30kHz, el qual transmet la vibració al booster i al sonotrode. El procés es pot dividir en tres etapes (Figura 8):

- 1) El sonotrode baixa, comprimint els pellets que es troben a la càmera de plastificació.
- 2) Comença la vibració del sonotrode i durant el temps que està vibrant (pocs segons), el pistó inferior avança, empenyent els pellets fosos cap a l'entrada del motlle.
- 3) El motlle s'omple i, finalment, s'aplica una post-pressió de compactació, amb el sonotrode estàtic, per tal d'eliminar xuclets i vacuoles que puguin quedar a l'interior de la peça, contrarestant els efectes de la contracció.

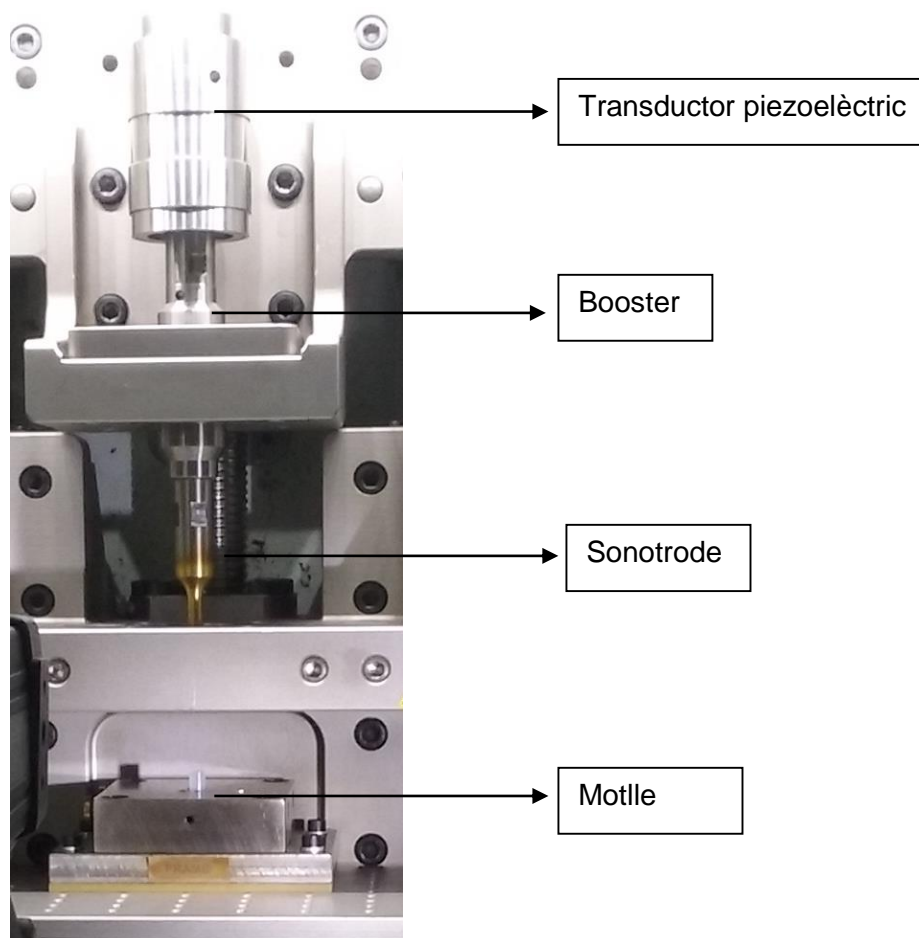


Figura 7: Esquema components Sonorus

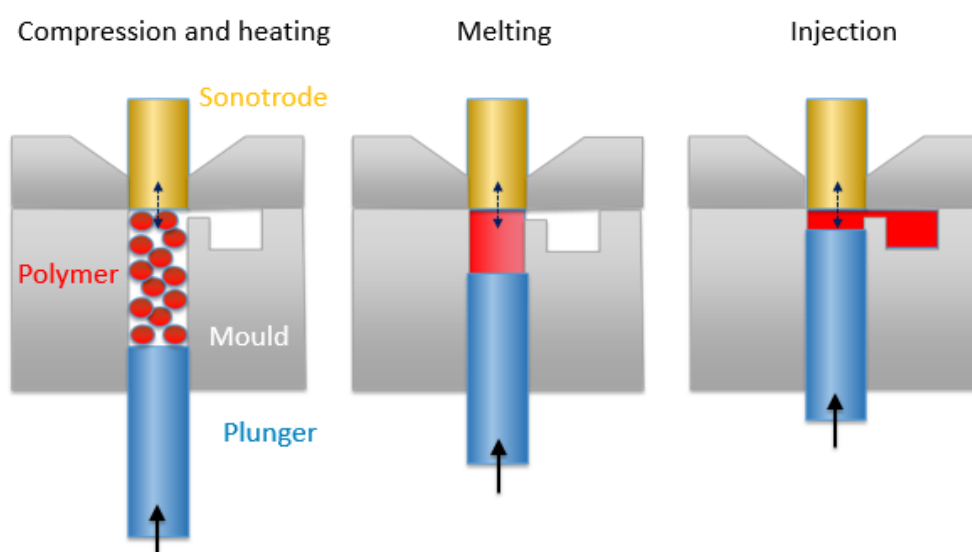


Figura 8: Etapes del procés USM. Font: University of Bradford

Aquesta és una tecnologia disruptiva i innovadora, degut tant a la senzillesa de la màquina (comparada amb una màquina de microinjecció), com als avantatges que aquesta comporta. Els més significatius són els següents:

- Baix temps de residència del material a la càmera d'injecció. El procés dura pocs segons, injectant el material a altes temperatures durant un període molt curt, que pot afavorir la no degradació del mateix.
- Disminució de la temperatura necessària per injectar el material, degut a la reducció de la viscositat per l'efecte dels ultrasons.
- Baixa pressió d'injecció. Al incrementar-se la fluïdesa del plàstic fos, es poden omplir geometries complexes a més baixa pressió que amb microinjecció convencional.
- Estalvi energètic. Els pellets s'escalfen localment, fet que provoca que l'energia necessària per incrementar la temperatura del material sigui molt menor a les de les màquines de microinjecció convencional.
- Estalvi de material. El material s'injecta dosis a dosis, i només la necessària per omplir la peça, sense deixar cap resta romanent a la càmera de plastificació. El runner d'una peça de microinjecció convencional pot comportar fins un 90% del material total, podent reduir aquest percentatge considerablement injectant per USM.
- Les tensions internes produïdes a la peça són menors.

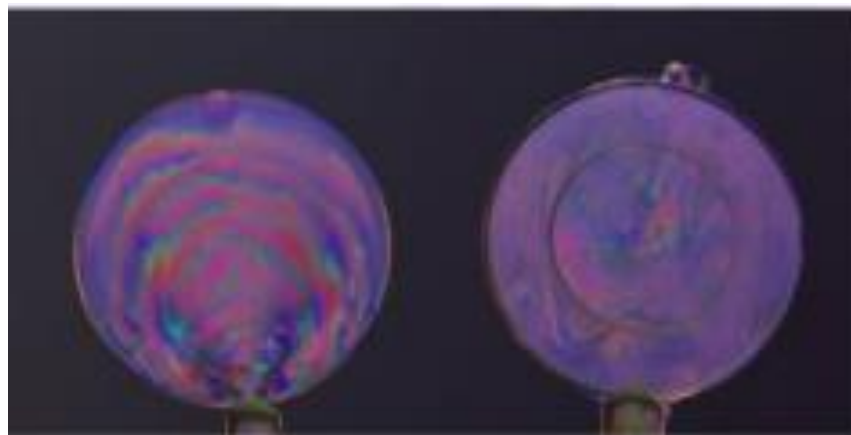


Figura 9: Tensions internes en una lent, estudiades pel mètode de birefringència (esquerra microinjecció convencional, dreta USM [13])

No obstant, aquesta tecnologia compta també amb alguns desavantatges que cal esmenar:

- Presència de bombolles a la peça, degut al fenomen de cavitació. S'han d'escollir els paràmetres d'injecció curosament, posant èmfasi en la pressió de compactació per tal d'eliminar les possibles bombolles que puguin aparèixer.
- Escalfament excessivament ràpid. La temperatura pot arribar a incrementar-se de 30°C a 200°C en 0,1 s.
- Coneixement poc profund sobre l'afectació dels paràmetres de procés en la peça final (objectiu d'aquest estudi).

A partir del desenvolupament del prototip de la Sonorus, es van realitzar els primers estudis de processabilitat amb diferents materials. Un primer estudi [14] [15] va analitzar experimentalment quines eren les condicions de procés òptimes per injectar peces de PLA i PMMA, tot i que el PMMA no va poder-se injectar sense degradar-se.

Posteriorment, amb el primer model industrial de la màquina fabricat (S1G), es van publicar estudis de dispersió de nanoclays en matrius de PLA i PBS [16], donant bons resultats amb paràmetres de procés òptims.

Tot i que alguns altres articles també han estudiat l'afectació dels paràmetres de procés en la peça final [16], es requereix d'un coneixement més ampli del principi de funcionament i un estudi experimental que abasti molts més paràmetres de procés dels estudiats. L'objecte d'aquest estudi és fer un primer anàlisi de l'afectació dels paràmetres de procés de la màquina en la peça injectada.

6. Teoria: Disseny Experimental

Un dels principals reptes en el procés de micromoldeig per ultrasons és conèixer, amb profunditat, quina és la incidència dels paràmetres de procés en el material que es vol injectar, i quina afectació tenen en les propietats de la peça resultant.

Aquests paràmetres poden ser inputs de configuració de la màquina, o bé paràmetres conseqüència tant de la configuració que s'ha fet del procés com d'altres característiques inherents de la geometria del motlle o del propi material.

Per tal de poder estudiar aquests paràmetres i quantificar quina incidència (i de quin tipus) tenen al procés de micromoldeig, s'ha plantejat un disseny experimental, el qual permet determinar-les amb paràmetres controlats i mesurats, en comparació a una resposta que s'ha pogut quantificar o bé en peça acabada (i.e propietats mecàniques, densitat) o bé durant el procés mitjançant sensorització (i.e temperatura, pressió).

El disseny d'experiments estadístic és utilitzat habitualment en processos industrials controlats, per conèixer quina és la incidència de cada paràmetre de configuració en el procés.

Aquesta metodologia permet obtenir un model que pugui predir les conseqüències de futures variacions dels paràmetres de procés, a més de permetre la optimització del mateix ajustant una configuració de paràmetres concreta.

En aquest cas, s'ha optat per aplicar un disseny d'experiments factorial, el qual controlant dos o més factors (k), a diferents nivells (q) i equidistants entre ells, es poden relacionar amb una resposta mesurada (y). Per tant, aplicant diverses repeticions en totes les combinacions de punts experimentals (q^k), s'obtenen diversos valors de les respostes mesurades, que serviran per determinar quina és la incidència de cadascun dels factor.

Els factors de control han de ser paràmetres que es puguin configurar, a diferents nivells, i assegurar que romanen constants durant tot el procés. Les respostes han de ser mesurables quantitativament i de forma fiable.

L'obtenció del model es basa en una regressió a partir d'un vector de respostes mesurades (Y) y una matriu de factors de control, a diferents nivells (X). A partir de la regressió, s'obté un vector de coeficients estimats ($\hat{\beta}$), que corresponen als coeficients associats a la interacció de cadascun dels factors de control, i de les possibles correlacions entre ells. Per tant, s'obté una equació que permet estimar el valor d'una resposta específica en funció del valor de cadascun dels factors de control.

$$Y = \hat{\beta}X \rightarrow \hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \rightarrow \hat{Y} = \hat{\beta}X$$

On:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & X_{11}X_{21} & X_{nk}^m \\ 1 & X_{11} & X_{22} & \dots & \dots \\ 1 & X_{12} & X_{21} & \dots & \dots \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1k} & X_{2k} & \dots & \dots \end{bmatrix} \rightarrow \hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_{12} \\ \vdots \\ \hat{\beta}_n \end{bmatrix}$$

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_3 X_3 + \hat{\beta}_{12} X_1 X_2 + \hat{\beta}_{13} X_1 X_3 + \hat{\beta}_{23} X_2 X_3 + \hat{\beta}_{11} X_1^2 + \hat{\beta}_{22} X_2^2 + \hat{\beta}_{33} X_3^2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n^k$$

Aquest model només serà vàlid i repetible si el procés s'ha mantingut constant i no ha variat les seves condicions durant la recollida de dades. Per tant, s'ha d'assegurar que la configuració dels paràmetres de control no afectarà a les condicions de treball del procés, falsejant la resposta mesurada. Això es duu a terme mitjançant un estudi dels residus generats, així com una comprovació de la significació del model obtingut.

6.1 Estudi dels residus

El primer pas correspon a comprovar que la diferència entre la resposta estimada en un punt concret i les respostes experimentals obtingudes en el mateix punt, anomenada residu ($\varepsilon = \hat{Y} - Y$), tenen una mitjana de zero i una variància també constant (per a tots els factors de control).

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

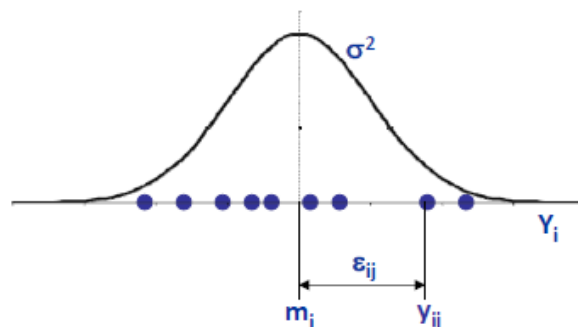


Figura 10: Residu d'una mostra experimental normal

Per comprovar aquesta hipòtesi, s'ha de realitzar una prova d'ajust normal als valors de residus obtinguts.

La prova d'ajust normal consisteix en realitzar una regressió lineal entre l'estadístic normal estàndard (Z) i els valors dels residus ordenats (ϵ) corresponents. L'estadístic normal estàndard correspon a una tipificació d'una suposada variable normal (ϵ), en una distribució normal equivalent, de mitjana nul·la i variància unitària (Z):

$$\epsilon \sim N(m = 0; \sigma^2 = ct) \rightarrow Z = \frac{\epsilon - m}{\sigma} \rightarrow Z \sim N(0; 1)$$

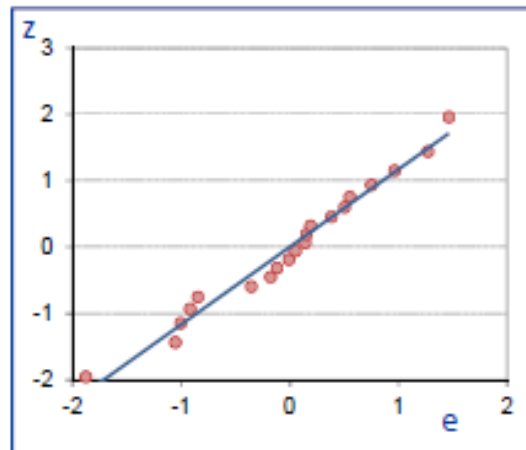


Figura 11: Ajust normal dels residus

Per tant, si el pendent de la recta obtinguda s'aproxima a la inversa de la desviació estàndard (σ), estimada a partir de les dades, i la mitjana calculada a partir de l'ordenada a l'origen (m/σ) correspon al valor estimat a partir de les dades (que en aquest cas, ha de ser 0), es pot considerar validada part de la primera hipòtesis.

Falta confirmar que la variància romangui constant per a tots els factors de control que intervenen al disseny d'experiments (k).

Per tal de corroborar-ho, es grafiquen els residus obtinguts per a cadascun dels factors de control, per separat. Si no s'observa cap tipus de tendència en quant a l'amplitud de dispersió dels valors, o la variació del valor mitjà, per a cada nivell de factor, es pot confirmar que els residus corresponen a una variable aleatòria de distribució probabilística normal, amb variància constant per a tots els nivells dels factors de control.

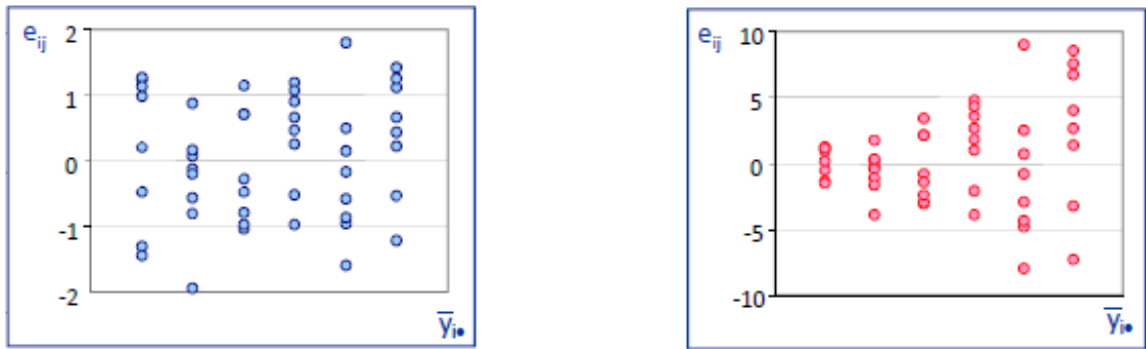


Figura 12: Residus amb variància constant (esquerra) i amb variància no constant (dreta)

6.2 Estudi de la significació del model

En quant al model obtingut de la regressió ($\hat{Y} = \hat{\beta}X$), s'ha de validar, en primer lloc, assegurant que la mitjana de les respostes experimentals és igual a la mitjana de les respostes estimades.

$$\bar{Y} = \bar{\hat{Y}}$$

Aquesta comprovació serveix per corroborar que el càlcul del vector de coeficients estimats ($\hat{\beta}$) s'ha realitzat correctament.

Un altre factor a tenir en compte és la variabilitat de les respostes mesurades. Una variabilitat excessiva o no constant pot invalidar el model obtingut, induint a tendències errònies o valors mitjans poc fiables.

Per tant, un cop obtingut el model, s'ha de comprovar que es tracta d'un model amb una distribució de probabilitat, en les respostes, normal i de variància constant.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

Per tal d'estudiar la variabilitat del procés, s'ha de realitzar un ANOVA (*analysis of variance*) de la regressió, utilitzant el F-test, ja que és sensible a la no normalitat i ens indicarà si el model calculat correspon a un model de distribució normal.

$$\text{Estadístic } F = \frac{\text{Variància explicada}}{\text{Variància no explicada}} = \frac{QME_x}{QMR} = \frac{\frac{SQE_x}{v_{Ex}}}{\frac{SQR}{v_R}}$$

On:

$$\frac{SQE_x}{v_{Ex}} = \frac{\sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{(p - 1)} : p = \text{punts experimentals diferents}$$

$$\frac{SQR}{v_R} = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n - p)} : n = \text{total punts experimentals}$$

L'estadístic F permet comprovar, amb una probabilitat de fals rebuig (α) fixada (típicament $\alpha=5\%$), si la hipòtesi nul·la (H_0) de que el model no és significatiu pot ésser rebutjada. Per tant, per a validar la significació del model, el p-value (o probabilitat de rebutjar la hipòtesi nul·la quan és certa) ha de ser menor que la probabilitat de fals rebuig fixada ($p\text{-value} < \alpha$).

$$\text{Model estimat: } \hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_{12} X_1 X_2 + \hat{\beta}_{11} X_1^2 + \hat{\beta}_{22} X_2^2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n^k$$

$$\text{Hipòtesi nul·la: } H_0: \beta_j = 0 \forall j = 1 \dots (p - 1) ; p \\ = \text{punts experimentals diferents}$$

Es calcula $F \rightarrow$ si $p\text{-value} < \alpha \rightarrow$ Rebutgem H_0 , per tant es valida el model

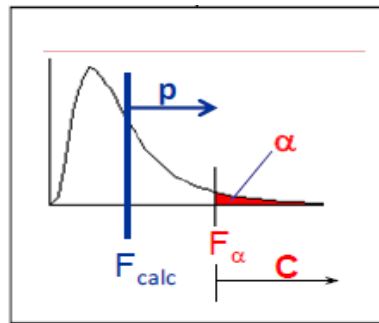


Figura 13: Distribució probabilística F o de Snedecor

Un cop validada la significació del model global, s'ha d'estudiar la significació de cadascun dels coeficients per separat, ja que poden haver termes del model saturat que no siguin vàlids, pel poc impacte que tenen en la regressió, induint a errors d'estimació i interpretació de la funció resultant.

El T-test és una eina estadística que es sol utilitzar en variables que segueixen distribucions normals, per determinar igualtats entre diferents poblacions. En regressions, es pot utilitzar per determinar la significació dels diferents pendents induïts per cada terme del model.

Per tant, es definirà com a hipòtesi nul·la (H_0) que el valor del coeficient estimat ($\hat{\beta}_j$) pot ser considerat zero, per a cadascun dels coeficients. L'estadístic T associat correspon al coeficient estimat dividit per la seva variància estimada ($S_{\hat{\beta}_j}$).

De la mateixa manera que a la prova d'hipòtesi F, s'ha de definir una probabilitat de fals rebuig (α , típicament del 5%). Si el p-value (o probabilitat de rebutjar la hipòtesi nul·la quan és certa) obtingut és menor que la probabilitat de fals rebuig ($p\text{-value} < \alpha$), es pot rebutjar la hipòtesi nul·la, i per tant acceptar la significació del terme en concret.

$$\text{Model estimat: } \hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_{12} X_1 X_2 + \hat{\beta}_{11} X_1^2 + \hat{\beta}_{22} X_2^2 + \dots + \hat{\beta}_n X_n^k$$

$$\text{Hipòtesi nul·la: } H_0: \beta_j = 0$$

(per a cada coeficient per separat, excloent l'ordenada a l'origen)

$$\text{Estadístic } T = \frac{\hat{\beta}_j}{S_{\hat{\beta}_j}}$$

$$= \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{QMR \cdot d_{\hat{\beta}_j}}}; \text{ on } d_{\hat{\beta}_j} \text{ correspon al terme de la diagonal } (X'X^{-1}) \text{ associat a } \hat{\beta}_j$$

Es calcula $T \rightarrow$ si $p\text{-value} < \alpha \rightarrow$ Rebutgem H_0 , per tant es valida el model

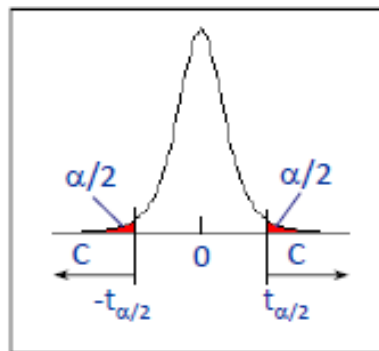


Figura 14: Distribució probabilística T o de Student

El t-test s'ha d'aplicar a cadascun dels termes, si algun resulta no significatiu s'haurà d'eliminar. Com el fet d'eliminar un terme comporta la modificació del model, sempre s'eliminarà el terme menys significatiu, i s'haurà de tornar a procedir amb el càlcul del model i la validació d'aquest, esdevenint en un procés iteratiu fins a obtenir un model amb tots els termes significatius.

6.3 Codificació del model i construcció de la superfície de resposta

Per tal d'evitar errors de càlcul per culpa de diferències significatives que puguin haver en l'ordre de magnitud entre els diferents factors de control, és recomanable codificar-los abans de calcular la regressió. Assumint que els nivells dels factors (q) són equidistants, es poden codificar, segons el número de nivells sigui parell o senar, de la forma següent:

$$\text{Si } q \text{ és senar: } X_{iq\text{codificat}} = \frac{X_{iq} - \bar{X}}{X_{i(q+1)} - X_{iq}}$$

$$\text{Si } q \text{ és parell : } X_{iq_codificat} = \frac{X_{iq} - \bar{X}}{\frac{X_{i(q+1)} - X_{iq}}{2}}$$

Un cop obtingut el model definitiu, es pot descodificar seguint el mètode invers.

Per tal d'analitzar d'una forma gràfica i més intuïtiva el model obtingut, es poden construir superfícies de resposta.

Per a fer-ho, s'han de deixar dos dels factors de control variables, i fixar tots els altres a un valor concret. Per tant, s'observarà la incidència dels dos factors variables en la resposta mesurada, amb els factors restants fixats.

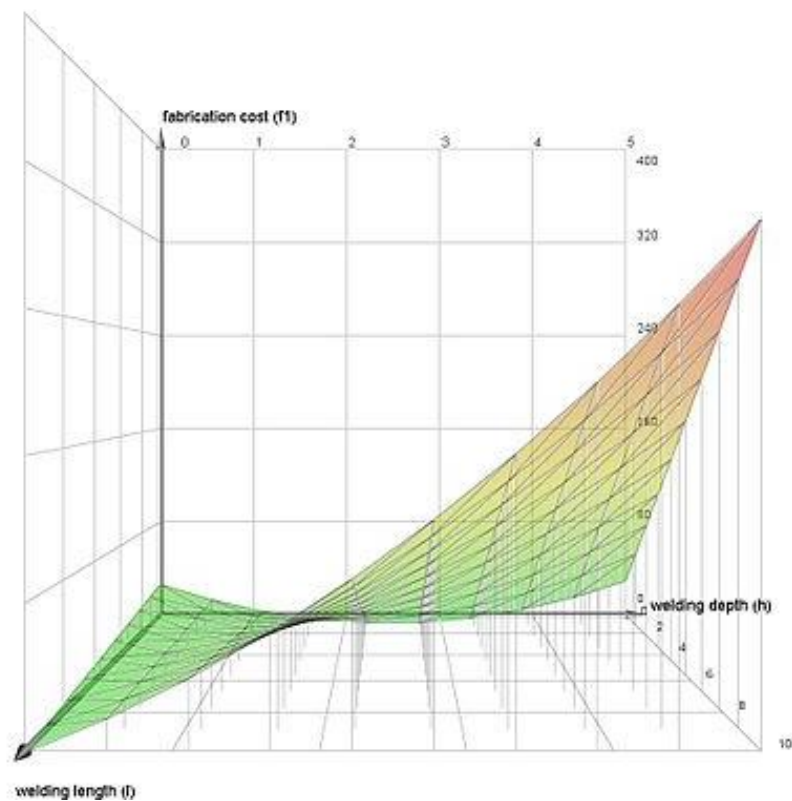


Figura 15: Exemple superfície de resposta

7. Estructura dels experiments

L'estructura per realitzar els experiments i el posterior anàlisi ha sigut la següent:

- 1) Elecció del material i el motlle a utilitzar. En aquest cas s'han utilitzats tres polipropilens (PP Eltex MED 100-MG03, PP Moplen RP348R i PP Hostacom PPU X9067HS) i dos motlles (anomenats ASCAMM i FRAME). El sensor està situat, en ambdós motlles, a final de peça, i recull temperatura i pressió.

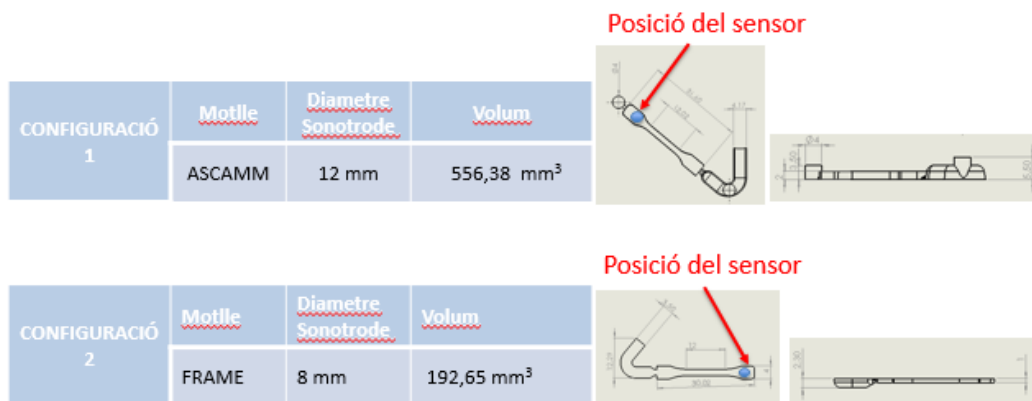


Figura 16: Configuracions de motlle utilitzades

- 2) Valoració de la finestra de procés a estudiar, i configuració de la màquina amb els paràmetres adients.
- 3) Realització dels cicles d'injecció i recollida de dades, tant de la màquina com del sensor.

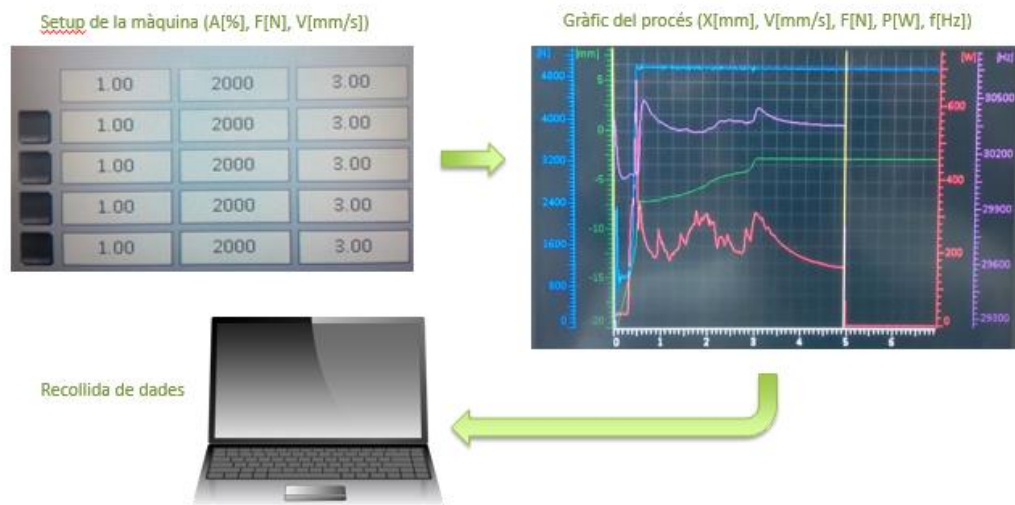


Figura 17: Recollida de dades de la màquina en un cicle d'injecció

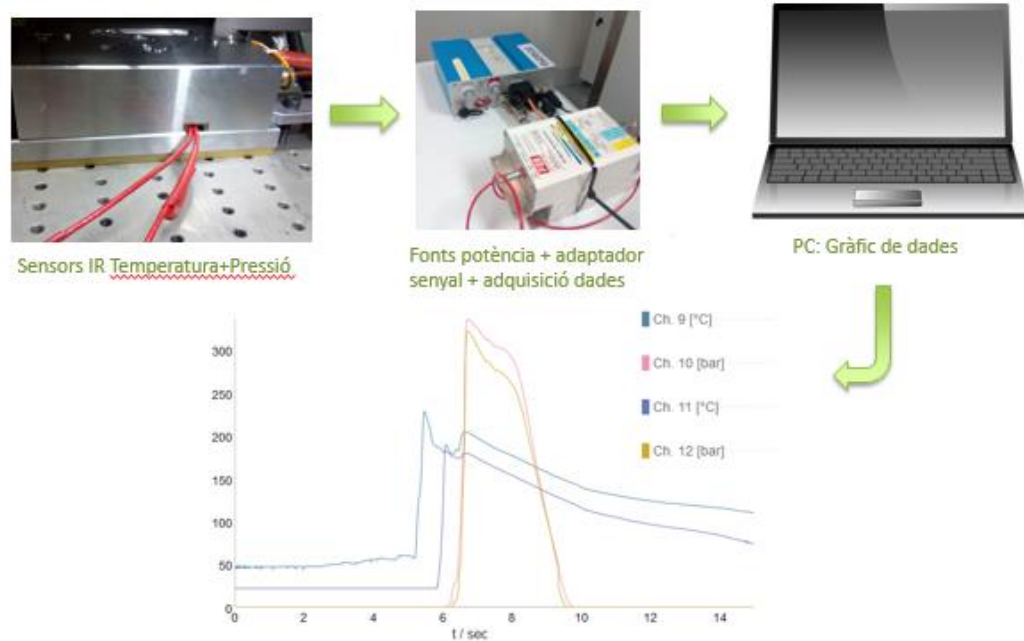


Figura 18: Recollida de dades del sensor en un cicle d'injecció

4) Obtenció de la matriu de respostes, de les dades recollides.

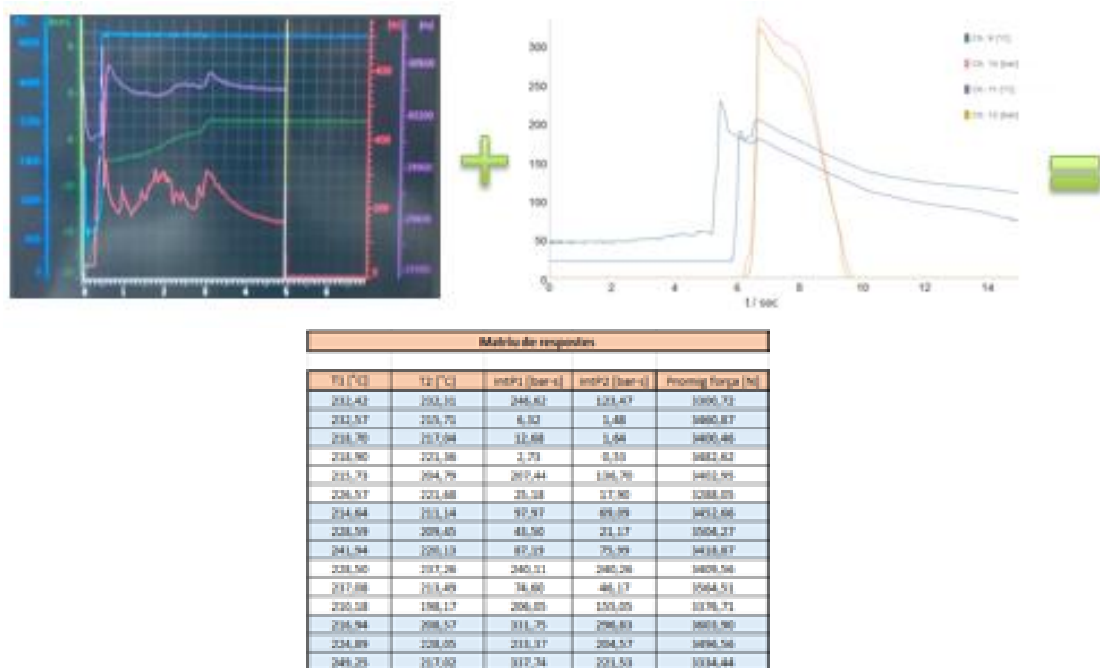


Figura 109: Obtenció de la matriu de respostes

L'estructura del tractament computacional de les dades (amb MatLab i Excel) 3 es pot veure a continuació.

³ El codi de Matlab utilitzat es pot trobar en l'annex.

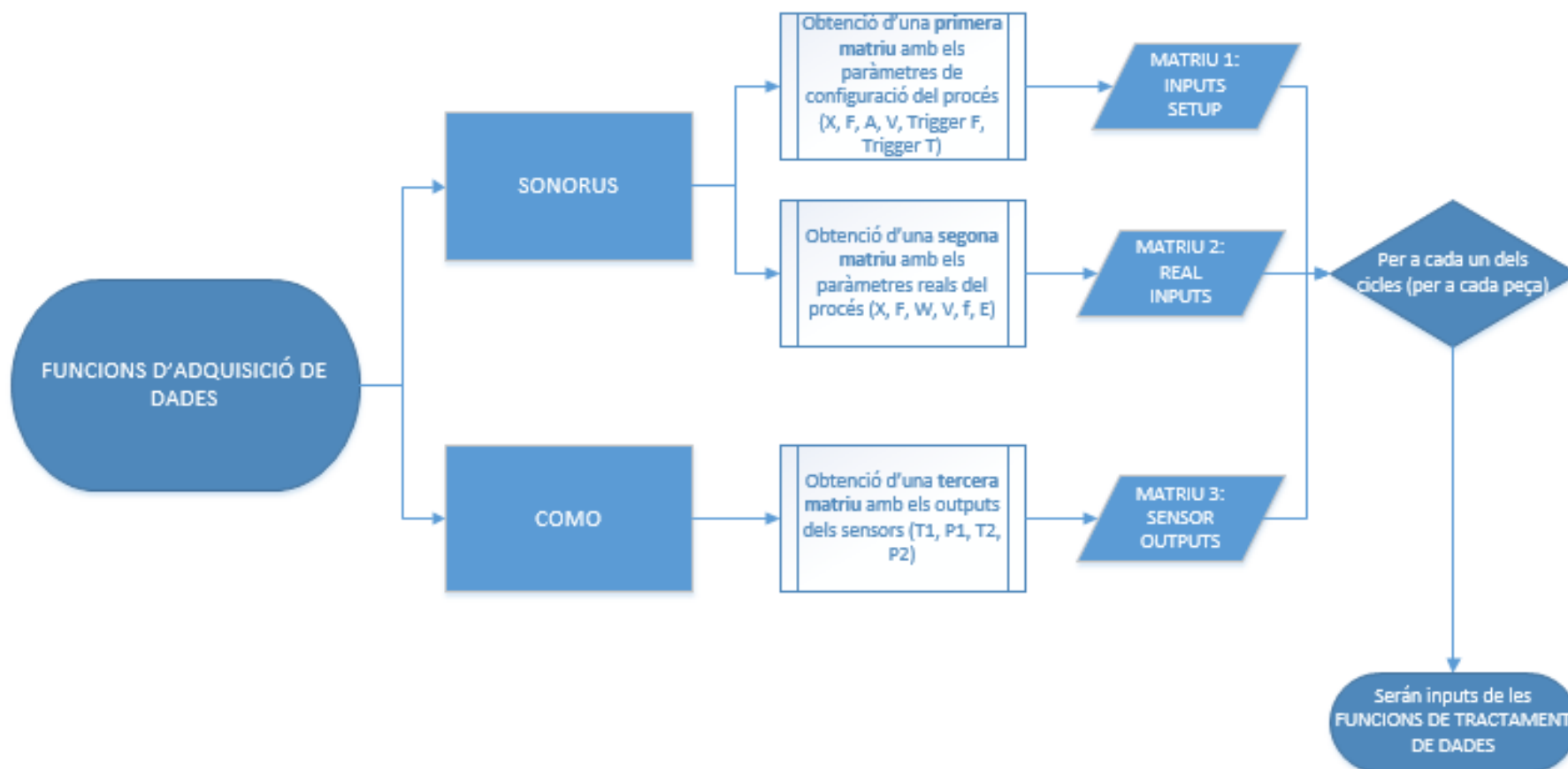


Figura 20: Estructura funcions d'adquisició de dades

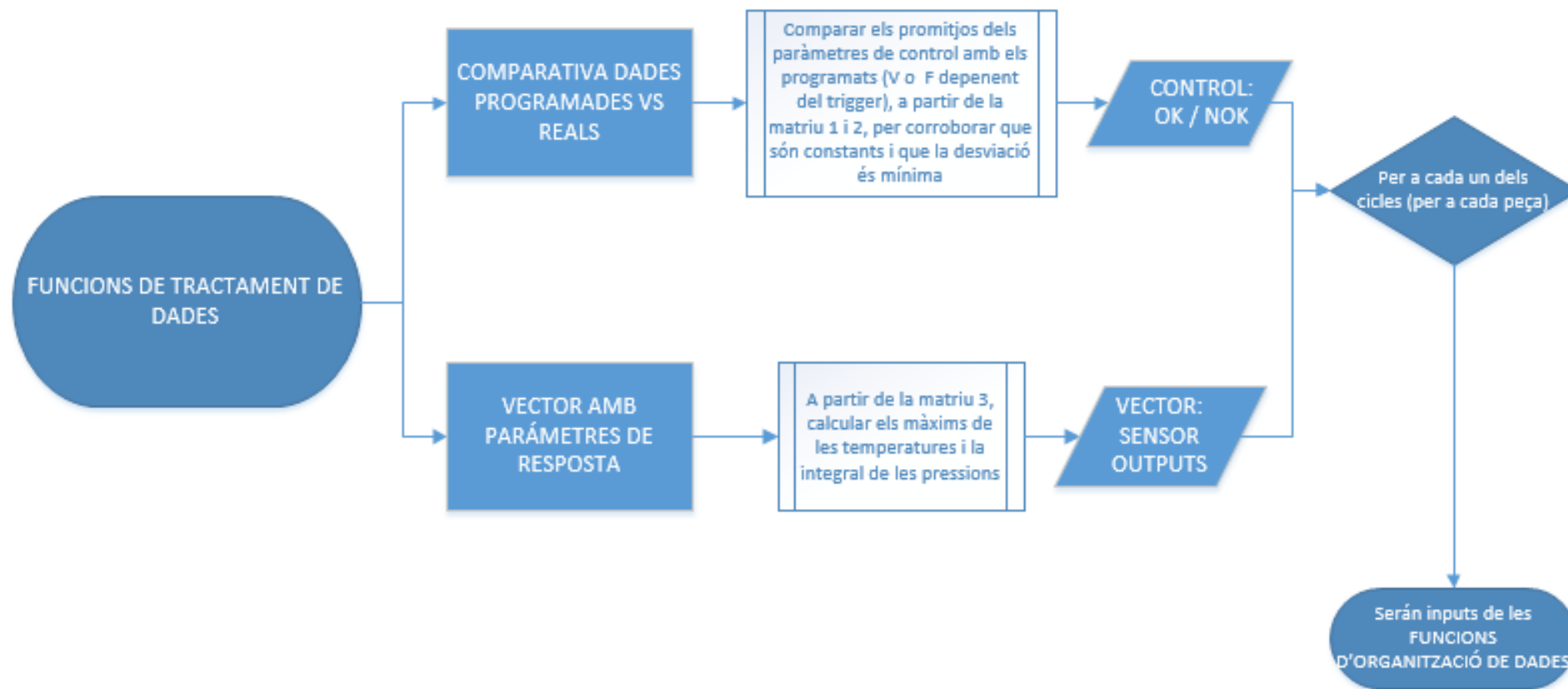


Figura 21: Estructura funcions de tractament de dades

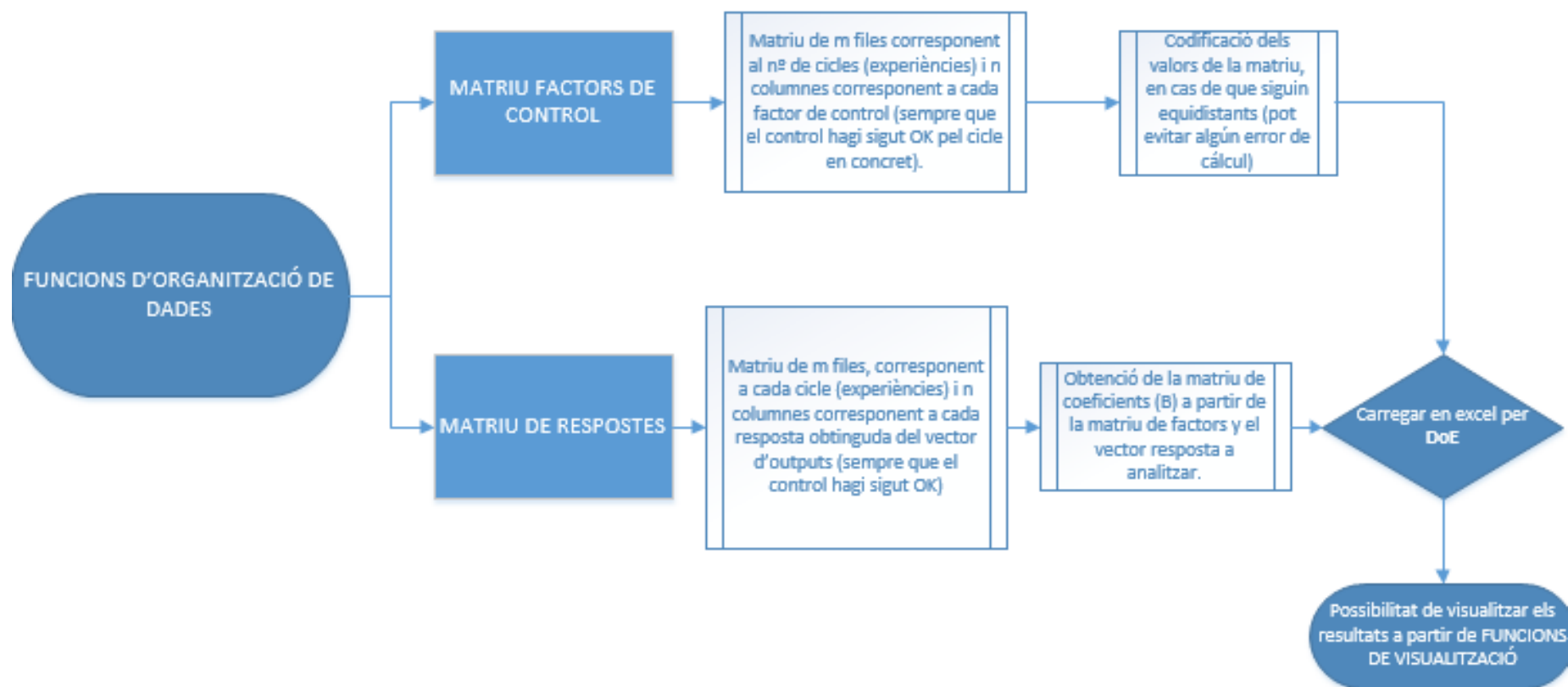


Figura 22: Estructura funcions d'organització de dades

8. Experiments realitzats

En primer lloc, es van haver de realitzar q experiments preliminars per tal de determinar el mínim número de repeticions necessàries per a cada punt experimental, així com l'amplitud de la finestra de procés per a cada paràmetre que es volgués estudiar, quins factors de control agafar, el màxim grau d'ajust del model o el ventall de respostes mesurables durant el procés.

Per tant, els primers quatre experiments no seran descrits en detall, ja que els resultats derivats no són vàlids, sinó només orientatius per poder realitzar correctament els experiments finals.

S'ha determinat que el paràmetre de resposta més representatiu, que es té actualment, és la temperatura que s'obté dels sensors infrarojos del motlle, relacionant-la amb els factor de control d'amplitud i velocitat d'injecció.

A continuació es descriuen els experiments que s'han realitzat amb la temperatura com a objecte d'estudi.

8.1 DoE 1: Influència de l'amplitud de vibració

En primer lloc s'ha realitzat un experiment per determinar quin tipus de resposta de temperatura és més representativa per a obtenir un bon model. En el motlle utilitzat (anomenat motlle ascamm) es tenen dos orificis on es poden incorporar dos sensors d'infrarojos, dels quals s'obtenen els valor de temperatura i pressió en temps real.

En aquest disseny d'experiments i en els posteriors, s'ha mesurat la temperatura en la posició de final de peça, al qual ens referirem com a valor de temperatura dos (T2).

L'experimentació s'ha realitzat amb el booster purple amplificant (0,6:1), sonotrode de diàmetre 12mm i material PP COPO RANDOM MOPLER RP348R, MFR=25g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada gran, del motlle ascamm.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
40	0,5-0,625-0,75-0,875-1	5200	3	5	6000	6

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
1	5	5	30	150

En aquest experiment s'han volgut calcular dos models, un amb la resposta Mitjana T2 i un altre amb la resposta Màxim T2, per tal de determinar quina d'elles serà la més adient per avaluar la temperatura. A més, es té com objectiu estudiar quina incidència té l'amplitud en aquestes dues respostes, ja que correspon al paràmetre principal de generació de calor durant el procés.

El primer pas correspon a l'estudi directe dels punts experimentals obtinguts. D'aquesta manera es poden intuir les tendències de les respostes a analitzar en funció dels nivells dels factors de control. A més, es pot valorar la dispersió dels valors de les respostes a cada punt experimental, i inclús la tendència a la distribució normal.

A	Mitjana Mitjana T2 [°C]	Desv.rel Mitjana T2 [%]	Mitjana Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
1	195,55	9,99007169	328,00	11,6360334
0,875	178,33	6,188503898	304,38	11,07399856
0,75	171,40	5,545812288	280,74	8,778635297
0,625	155,48	6,824197778	231,30	7,842073455
0,5	135,57	5,779047919	193,09	7,195740013

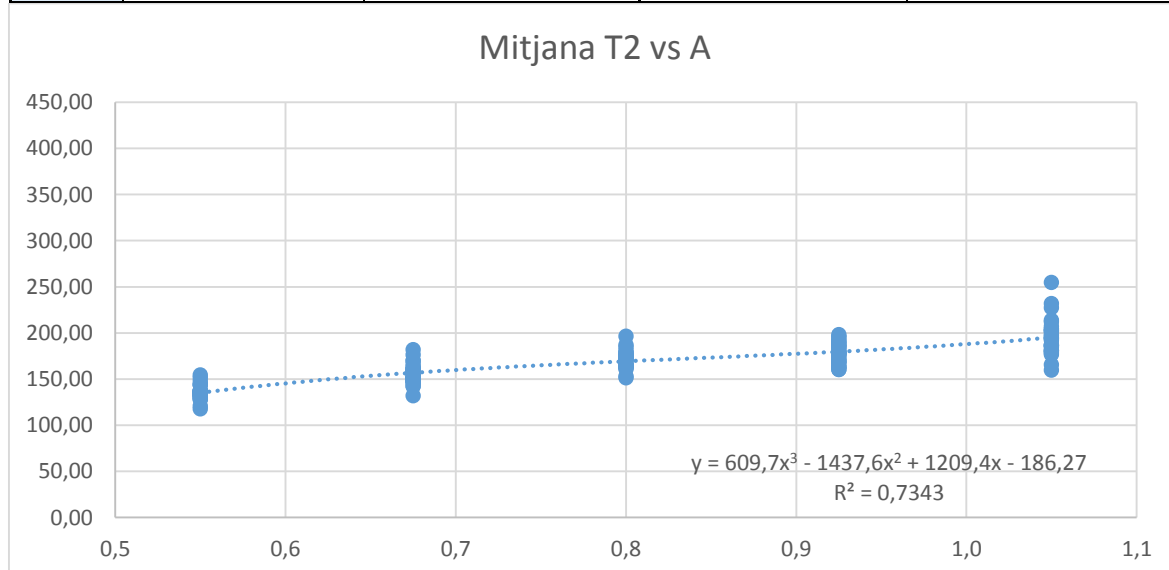


Figura 23: Mitjana T2 vs A (dades experimentals)

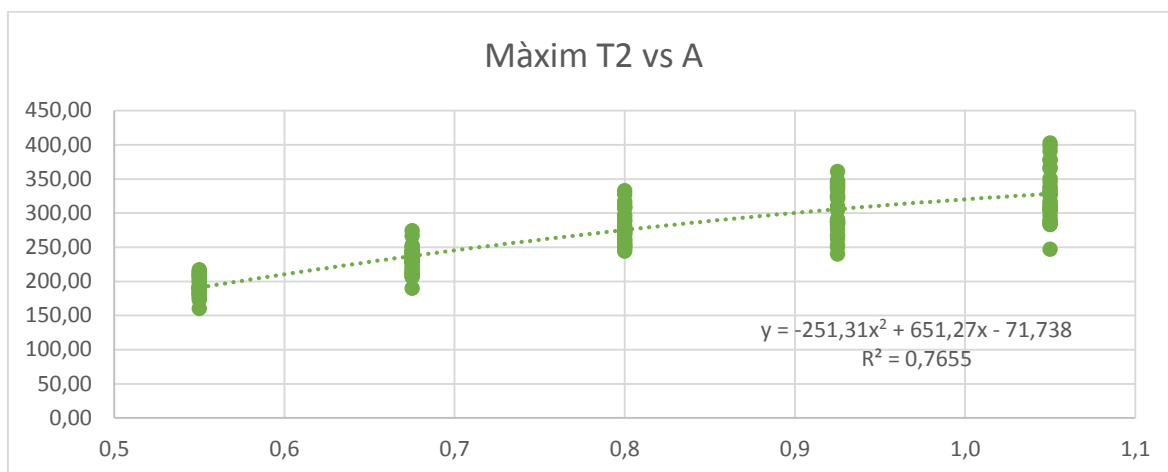


Figura 24: Màxim T2 vs A (dades experimentals)

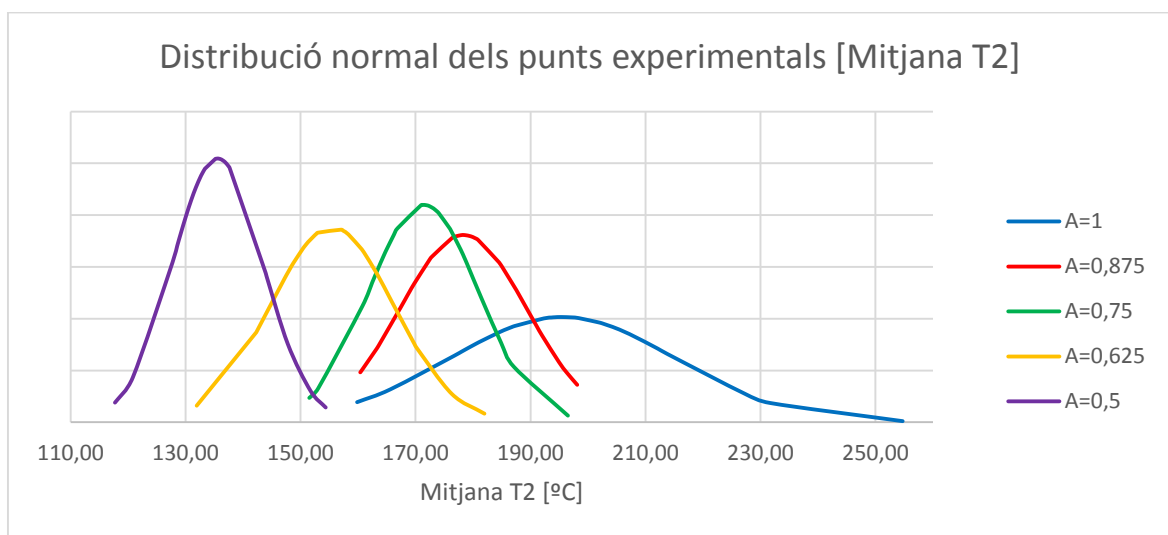


Figura 24: Distribució normal del punts experimentals (Mitjana T2)

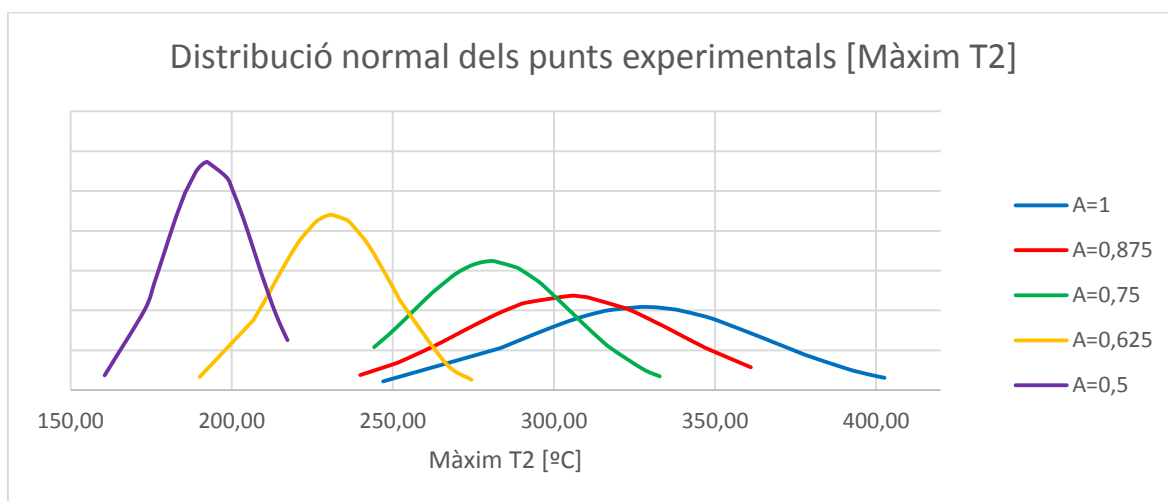


Figura 25: : Distribució normal del punts experimentals (Mitjana T2)

Fent un primer estudi de les dades obtingudes, es pot determinar que els valors mitjans tenen menys dispersió que els màxims, tot i que una tendència creixent similar al augmentar l'amplitud. Això era d'esperar, ja que els valors mitjans tenen en compte la fase de refredament de la peça, que és similar en la majoria d'injectades, mentre que el valor màxim de temperatura que arriba al sensor és el que produeix major variació entre cicles d'injecció.

El pròxim pas es valorar els dos models calculats, amb resposta Mitjana T2 i Màxim T2.

La validació del model per a la resposta **Mitjana T2** ha sigut la següent:

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

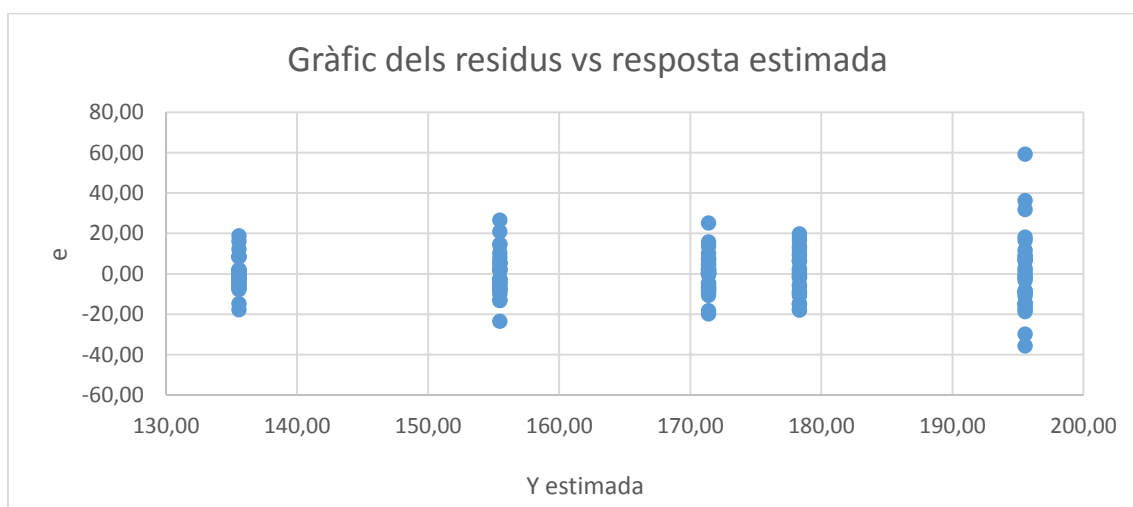


Figura 26: Residus vs resposta estimada (Mitjana T2)

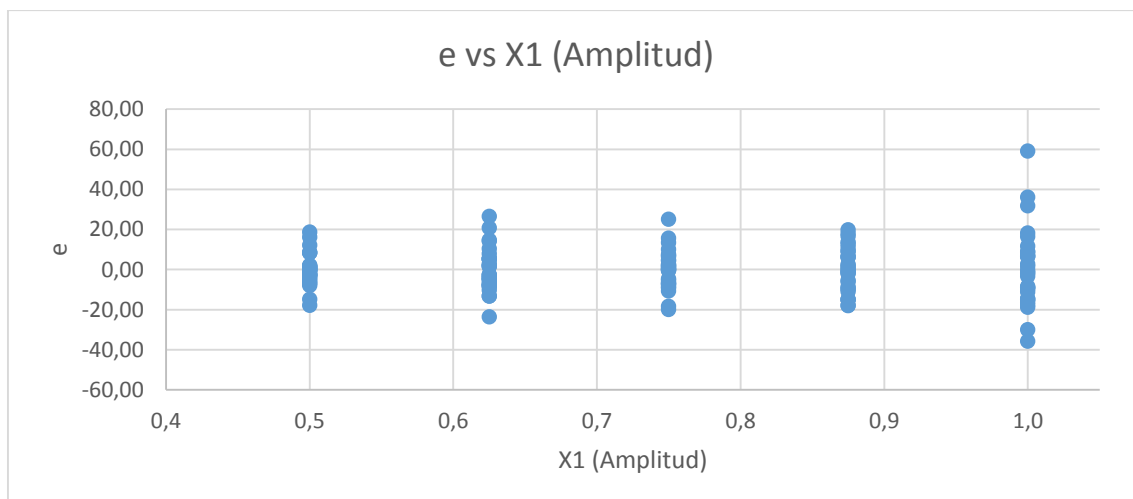
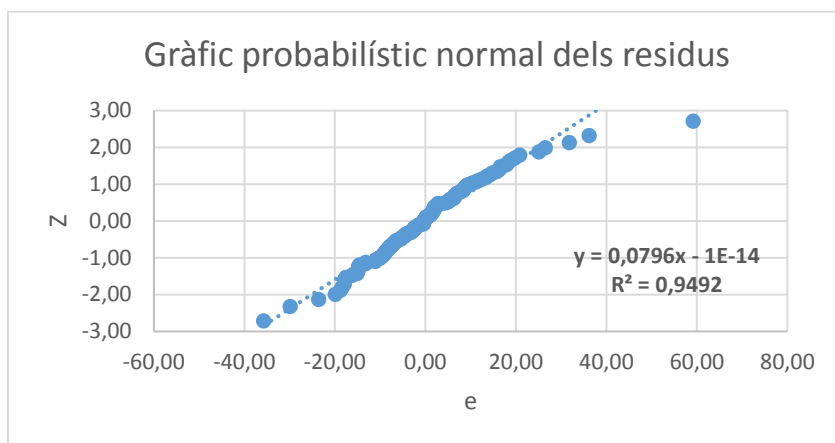


Figura 2711: Residus vs Amplitud (Mitjana T2)



Ajust	
σ gràfic	σ dades
27,03	26,92
m gràfic	m dades
0,00	0,00

Figura 28: Ajust normal dels residus (Mitjana T2)

Com ja s'havia observat en la distribució normal dels punts experimentals, en el punt d'amplitud més gran la dispersió de la resposta és major que a la resta de punts. Això podria indicar que aquest últim no seria un bon punt de procés. Aquest fet s'ha de tenir en compte quan es vulgui estimar la resposta en el rang d'amplitud màxim, a partir del model obtingut, ja que l'ajust no serà tant acurat com als altres punts.

En quant a la prova d'ajust, els residus mostren una distribució normal acceptable, que difereix lleugerament a l'últim punt.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model calculat és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	4	62483,85	15620,96147	101,734024	4,44905E-41
Residus	145	22264,33	153,547071		
Total	150	84745,65202			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori el terme quadràtic i quàrtic no són significatius al model final.

	Coefficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	171,40	0,033333333	2,262351808		
X1	10,23	0,030092593	2,149564945	4,75954191	4,6478E-06
X1X1	-5,51	0,081828704	3,544651997	-1,55323193	0,122547678
X1X1X1	1,19	0,002314815	0,596182048	1,99752557	0,04763898

X1X1X1X1	1,01	0,004050926	0,788674718	1,28210864	0,201850626
----------	------	-------------	-------------	------------	-------------

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coeficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	167,27	0,006666667	1,020431377		
X1	10,23	0,030092593	2,167999794	4,71907076	5,46703E-06
X1X1X1	1,19	0,002314815	0,601294956	1,9805403	0,049509239

$$\hat{Y} = 167,27 + 10,23X_1 + 1,19X_1^3$$

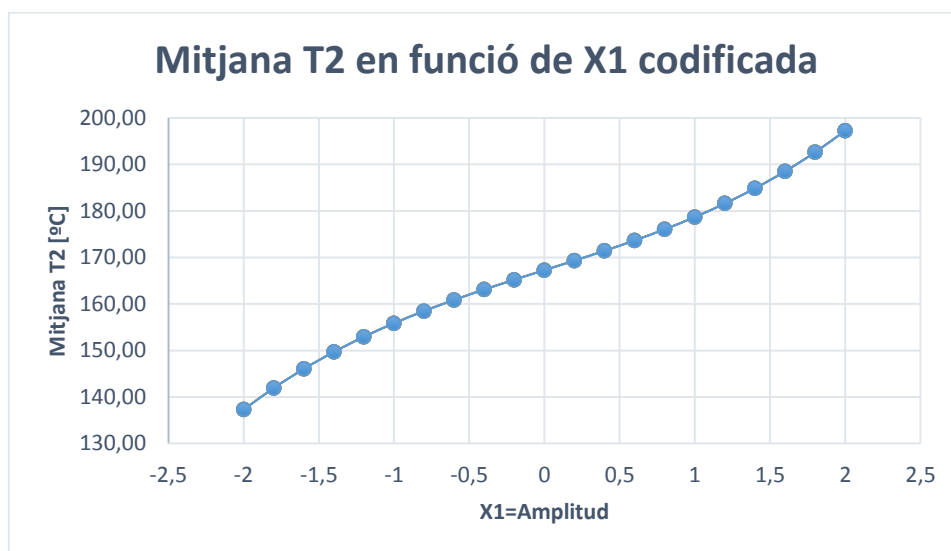


Figura 29: Resposta Mitjana T2 en funció de X1 codificada

Descodificant la variable X1:

$$\hat{Y} = -151,15 + 1110A - 1370,88A^2 + 609,28A^3$$

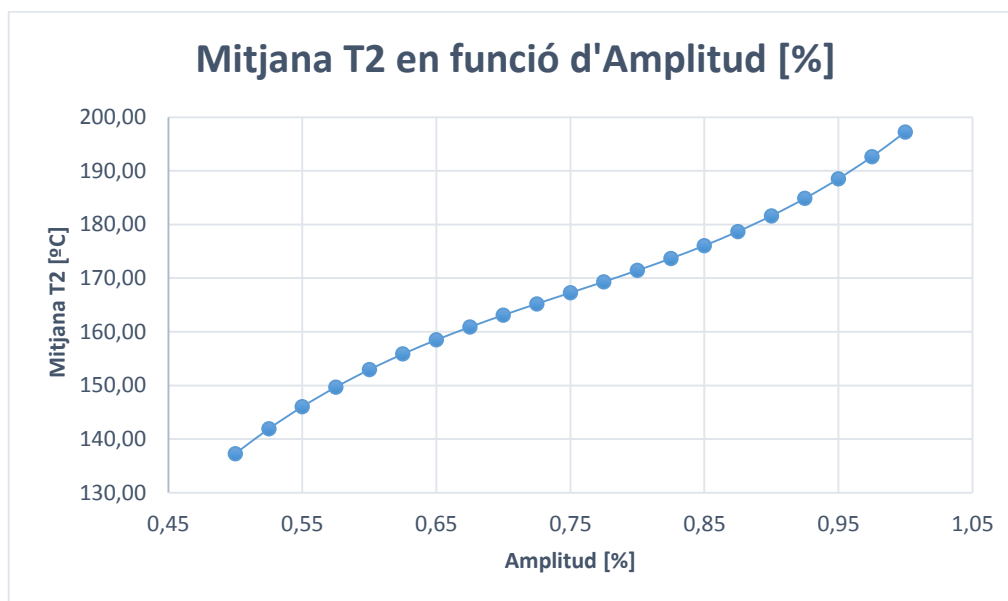


Figura 30: Resposta Mitjana T2 en funció de A [%]

És també d'interès tenir l'amplitud en unitats de micres, per poder extrapolar els resultats sense dependre del booster i el sonotrode utilitzats:

$$\hat{Y} = -151,15 + 12,09A - 0,16A^2 + 0,0008A^3$$

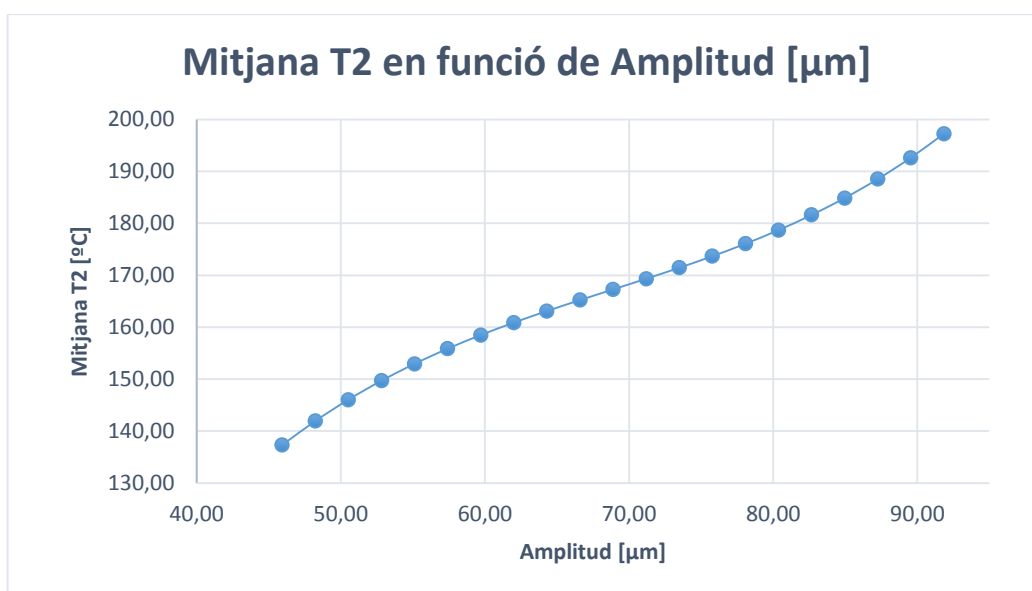


Figura 3112: Resposta Mitjana T2 en funció de A [micres]

La validació del model per a la resposta **Màxim T2** ha sigut la següent:

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

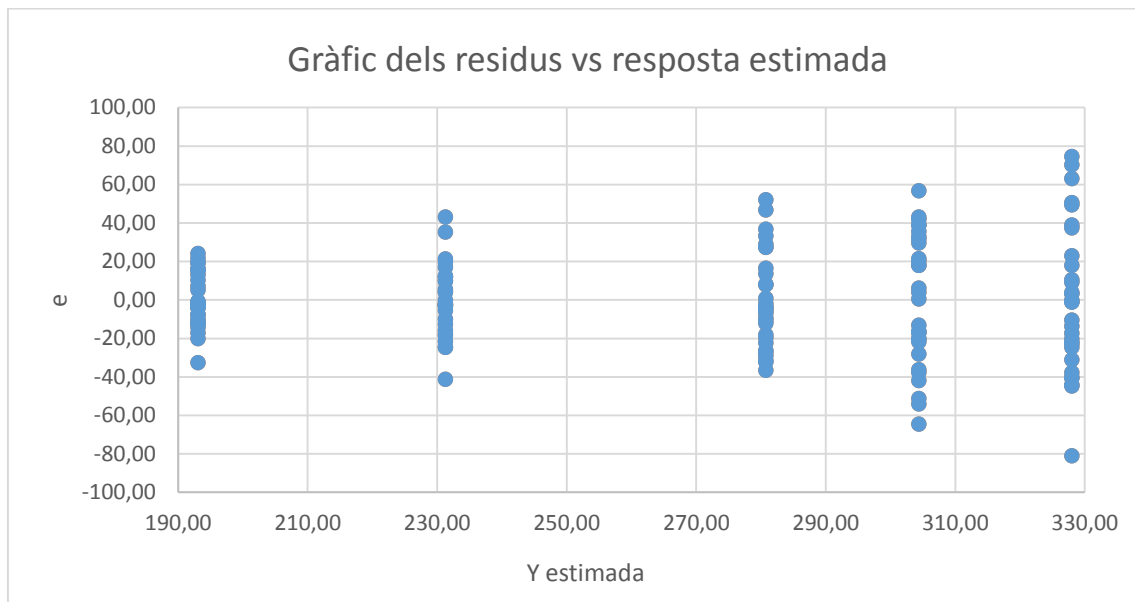


Figura 32: Residus vs resposta estimada (Màxim T2)

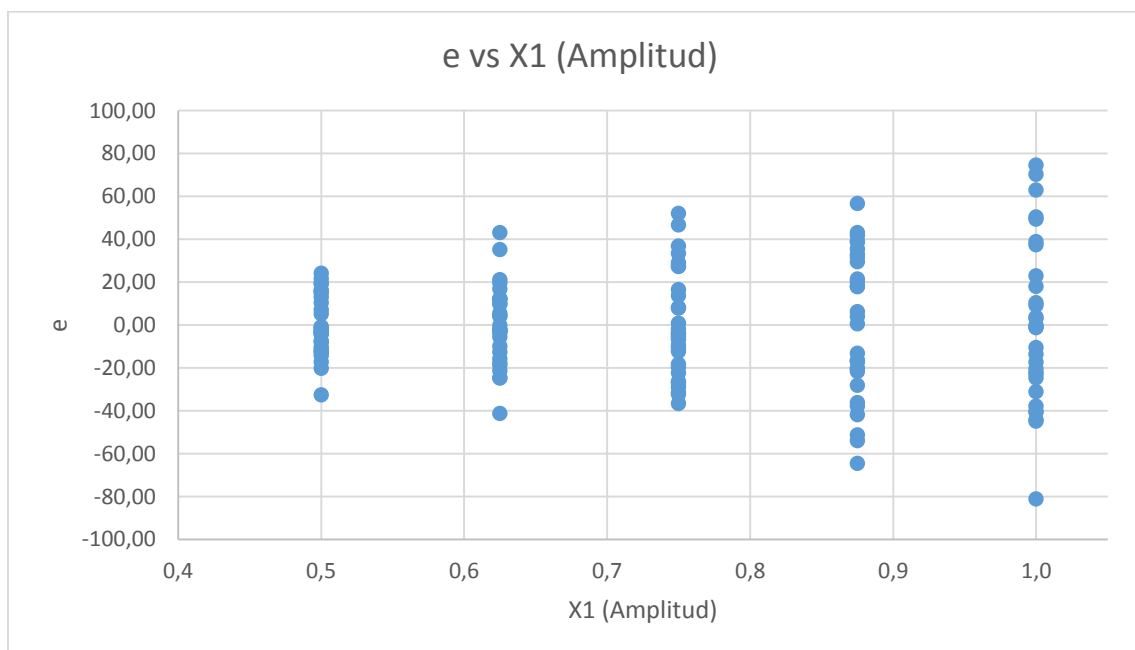


Figura 33: Residus vs Amplitud (Màxim T2)

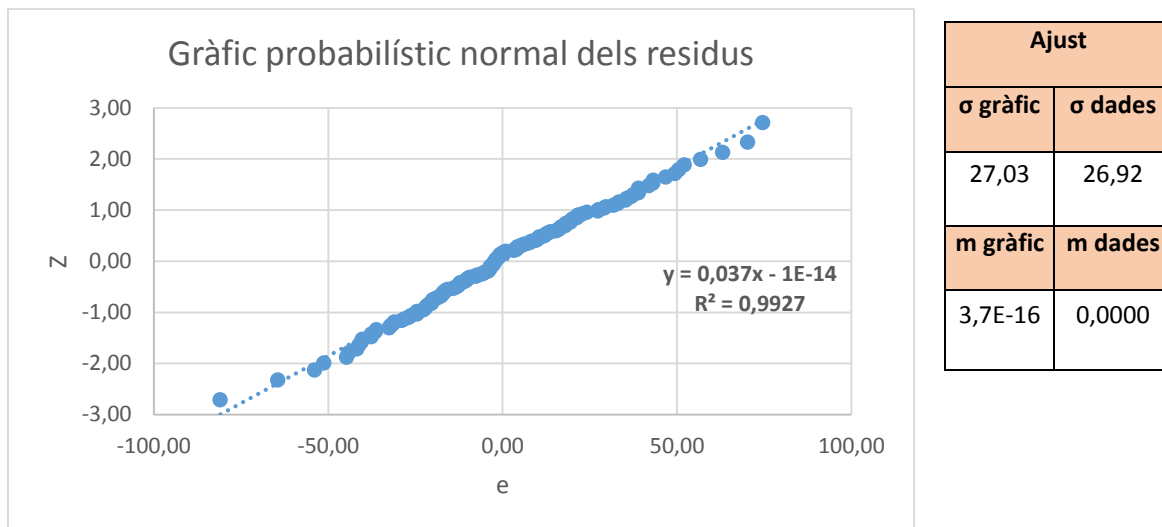


Figura 34: Ajust normal dels residus (màxim T2)

El gràfic de residus mostra com la variància creix conforme s'augmenta l'amplitud, per tant no és constant per a tot el procés, sinó que es va dispersant progressivament. Analitzant els valors màxims de temperatura, s'observa que les dispersions són considerablement grans en els tres punts d'amplitud més elevada, on aquests valors són, de mitjana, molt superiors al valor de fusió del polipropilè, comprès entre 180 i 200 °C. Per tant podria ser que la dispersió en els punts de major amplitud estigués lligada al sobreescalfament i degradació del material. Aquest fet s'estudiarà en experiments posteriors.

Si observem l'ajust normal, els residus es mostren millor ajustats que en el cas anterior. Tot i així, podem dir que aquests segueixen una distribució normal però de variància no constant.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	4	361247,75	90311,93766	121,315142	3,07946E-45
Residus	145	107943,91	744,4407666		
Total	150	469198,5836			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori el terme quàrtic i quadràtic no són significatius en el model final.

	Coefficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	280,74	0,033333333	4,981434755		
X1	37,47	0,030092593	4,733091241	7,91730048	5,77507E-13
X1X1	-15,51	0,081828704	7,80491018	-1,98761808	0,048737323
X1X1X1	-0,94	0,002314815	1,31272332	-0,71363519	0,476599864
X1X1X1X1	2,62	0,004050926	1,736569723	1,50661801	0,134084093

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori el terme cúbic i quàrtic no són significatius al model final.

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coefficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	275,35	0,016190476	3,48090955		
X1	34,29	0,003333333	1,579436972	21,7091073	1,04961E-47
X1X1	-3,93	0,002380952	1,334867877	-2,94148962	0,003796056

$$\hat{Y} = 275,35 + 34,29X_1 - 3,93X_1^2$$

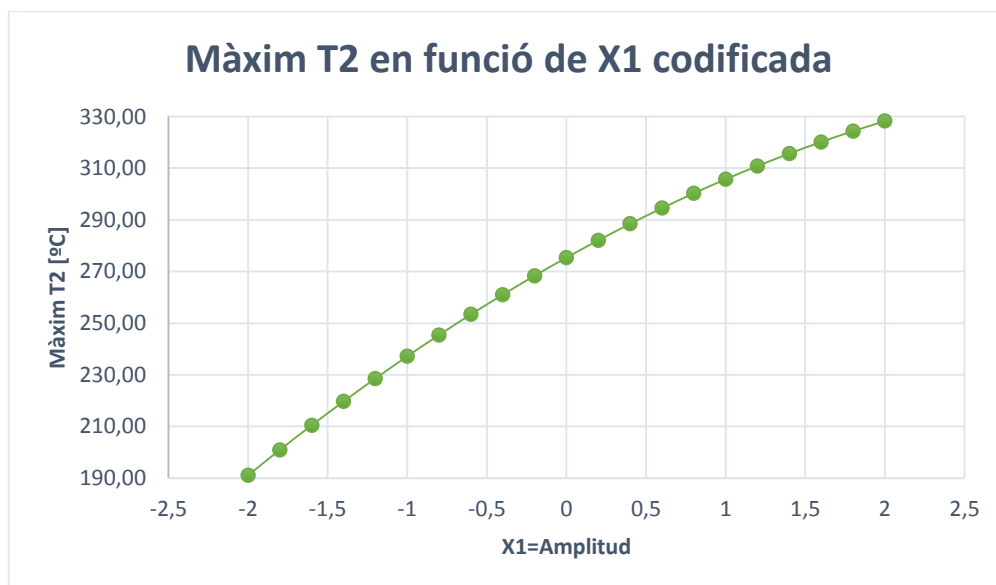


Figura 35: Màxim T2 vs X1 codificada

Descodificant la variable X1:

$$\hat{Y} = -71,87 + 651,60A - 251,52A^2$$

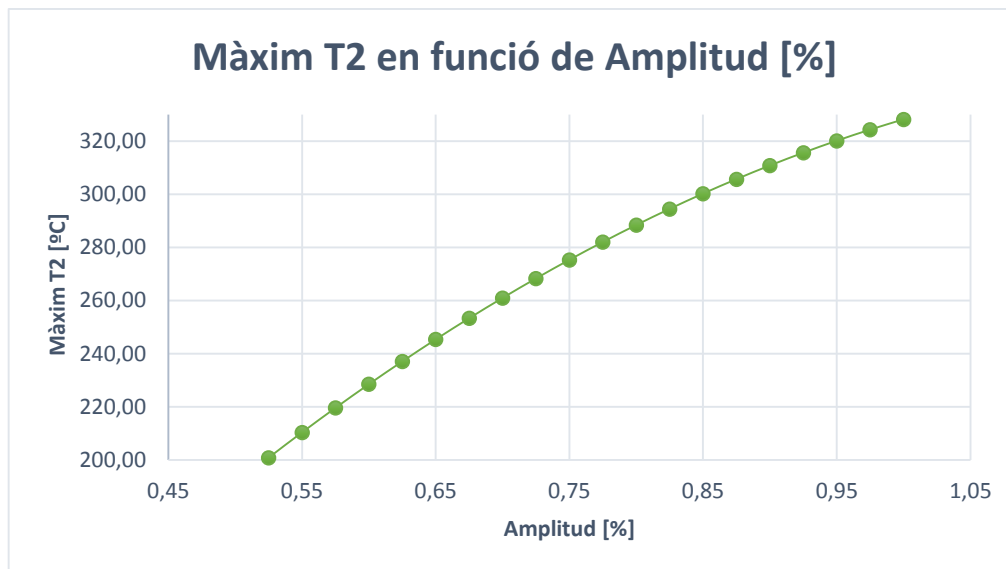


Figura 36: Màxim T2 vs Amplitud [%]

És també d'interès tenir l'amplitud en unitats de micres, per poder extrapolar els resultats sense dependre del booster i el sonotrode utilitzats:

$$\hat{Y} = -71,87 + 7,09A - 0,03A^2$$

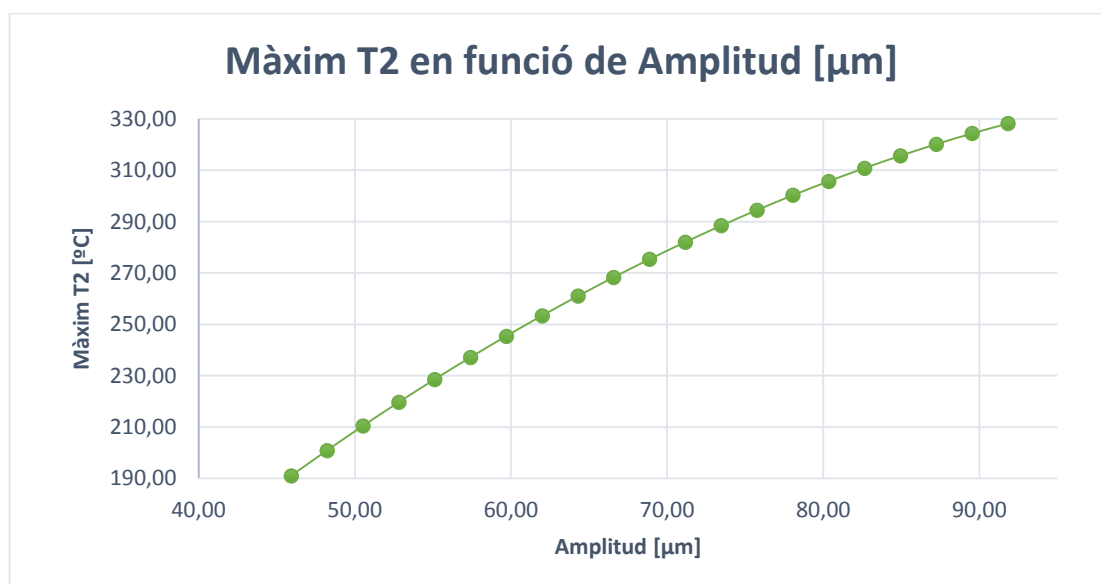


Figura 37: Màxim T2 vs Amplitud [micres]

8.2 DoE 2: Influència de l'amplitud i la velocitat d'injecció

L'experiment s'ha realitzat al motlle ascamm sensoritzat, amb l'objectiu d'estudiar l'efecte tant de l'amplitud com de la velocitat al valor màxim de temperatura.

L'experimentació s'ha realitzat amb el booster purple amplificant (0,6:1), sonotrode de diàmetre 12mm i material PP COPO RANDOM MOPLER RP348R, de MFR=25g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada gran, del motlle ascamm.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
40	0,625-0,75-0,875	6000	3-4-5	5	6000	6

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
2	3	9	30	270

En aquest experiment s'ha volgut valorar l'acció afegida de la velocitat d'injecció, a més de l'amplitud, en els valor màxims i mitjans de temperatura (T2). Per tant s'obtingran models en funció de dues variables, que per interpretar-los es construïran en forma de superfícies de resposta (tridimensionals).

El primer anàlisi correspon a l'estudi directe dels diferents punts experimentals obtinguts, valorant la dispersió de les respostes i l'ajust normal d'aquestes, així com la tendència general a la que indueix cada factor.

A	V	Promig Promig T2 [°C]	Desv.rel Promig T2 [%]	Promig Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
0,875	5	174,45	6,00	276,40	8,53
0,75	5	163,37	6,60	248,05	8,03
0,625	5	151,32	4,95	221,16	5,58
0,875	4	178,23	9,79	284,00	11,20
0,75	4	168,07	6,09	258,52	8,47
0,625	4	156,53	4,49	229,80	9,24
0,875	3	193,64	7,95	324,73	12,74

0,75	3	161,31	8,90	263,24	13,93
0,625	3	150,91	11,16	227,64	10,03

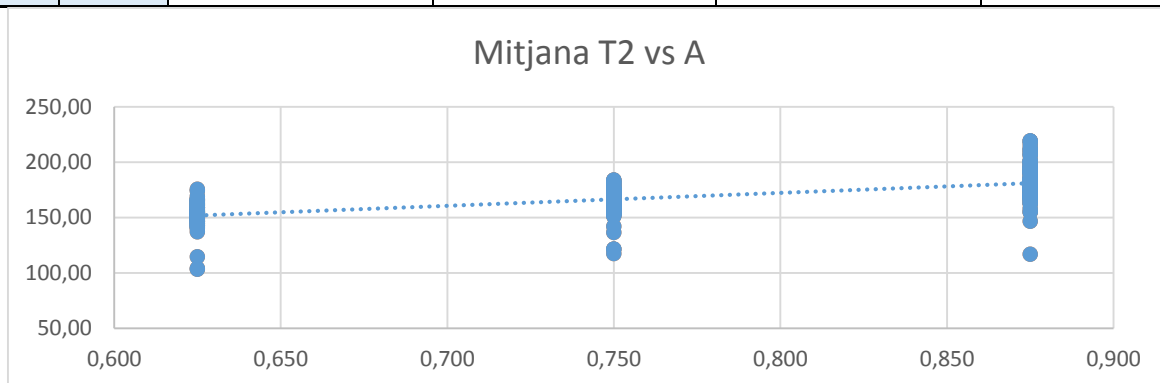


Figura 38: Mitjana T2 vs A (dades experimentals)

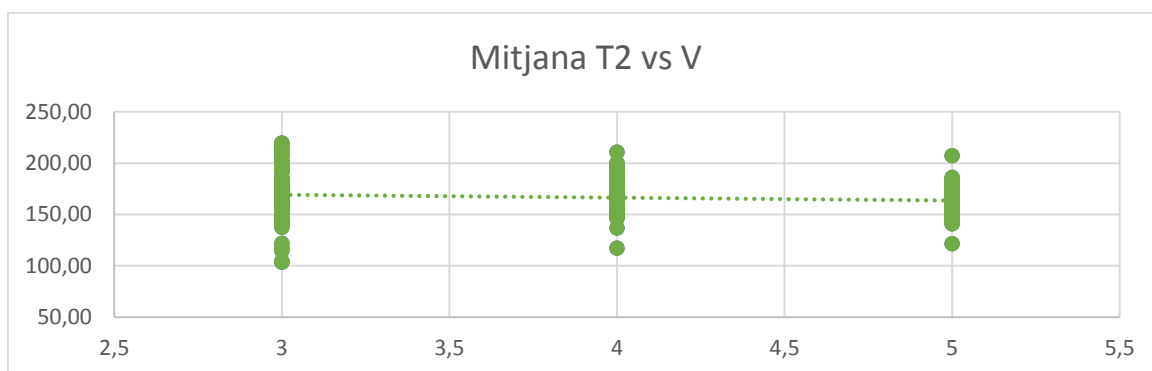


Figura 39: Mitjana T2 vs V (dades experimentals)

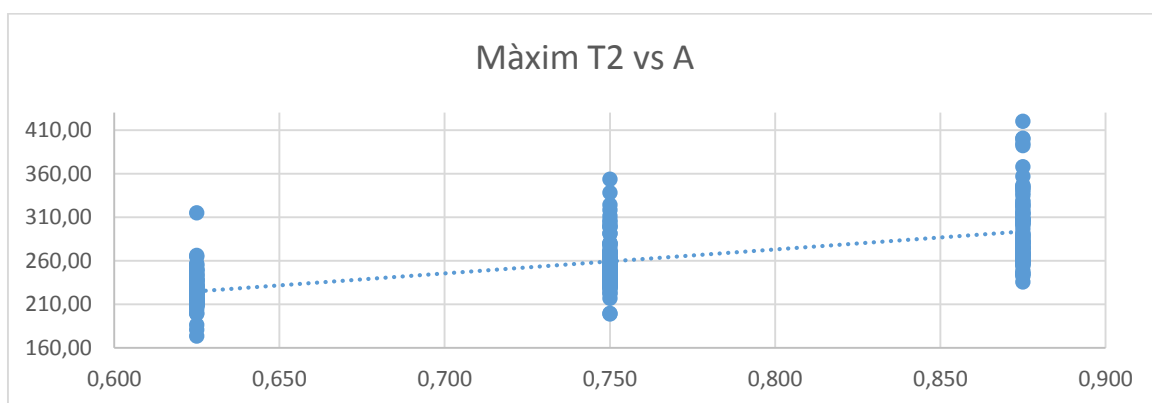


Figura 40: Màxim T2 vs A (dades experimentals)

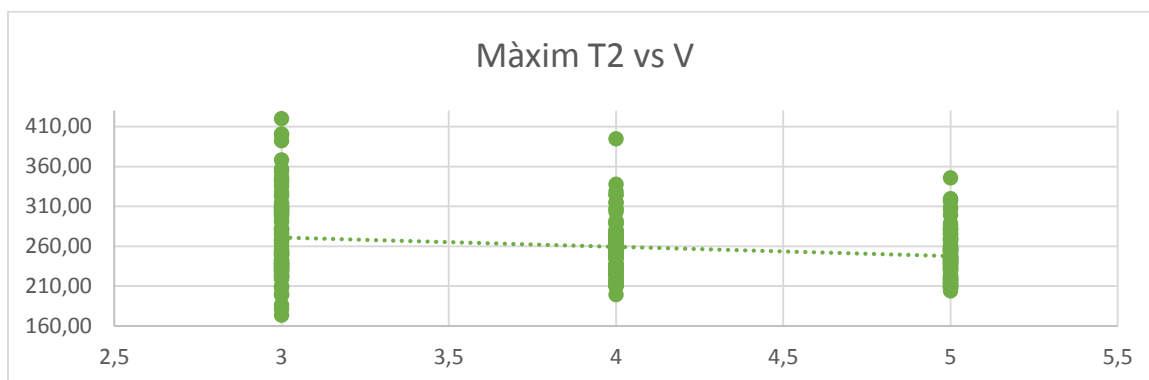


Figura 41: Màxim T2 vs V (dades experimentals)

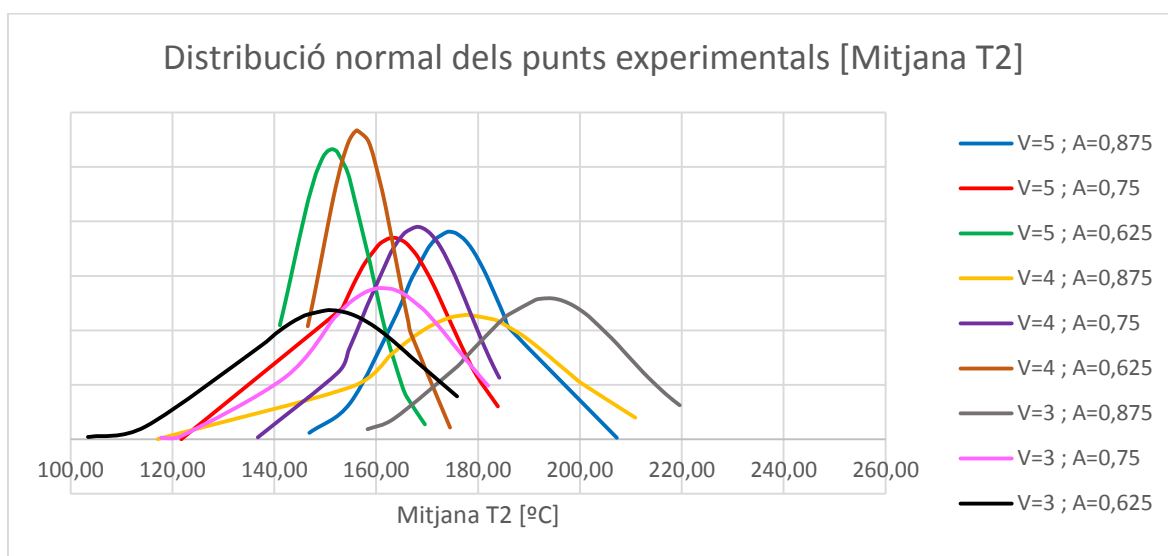


Figura 42: Distribució normal dels punts experimentals (Mitjana T2)

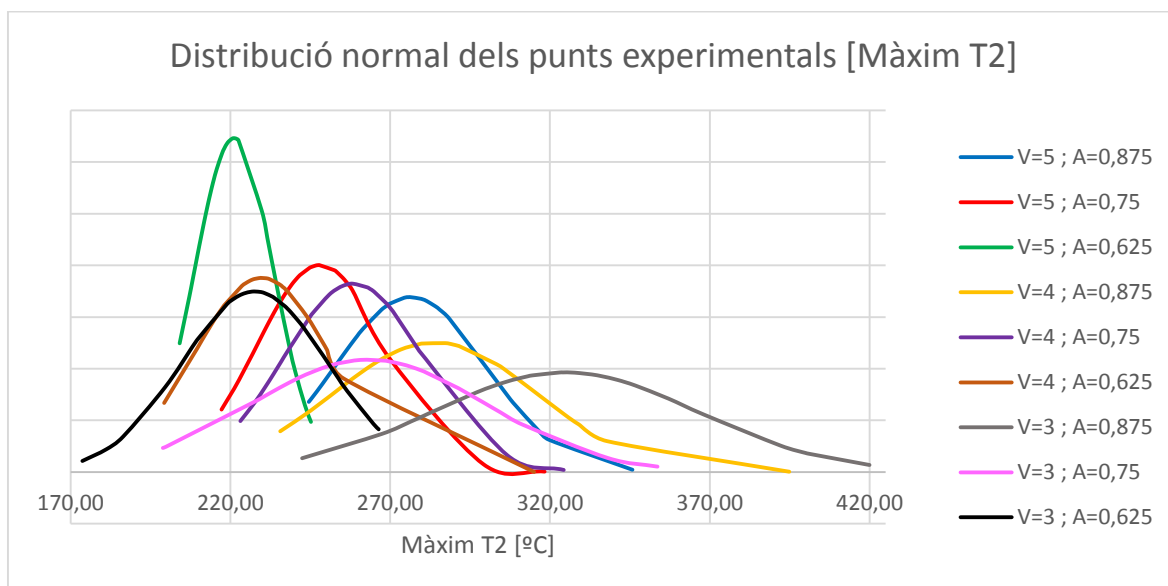


Figura 43: Distribució normal dels punts experimentals (Màxim T2)

Tal i com s'ha observat a l'experiment anterior, la dispersió és menor en els valors mitjans que en els màxims, però això és induït per la fase de refredament, que és molt més constant i està englobada en les mitjanes de les temperatures. Si ens fixem en les campanes gaussianes, sembla que per a valors baixos d'amplituds, i alts de velocitats, la dispersió tendeix a reduir-se.

El següent pas consisteix en la validació estadística dels models.

La validació del model per a la resposta **Mitjana T2** ha sigut la següent:

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

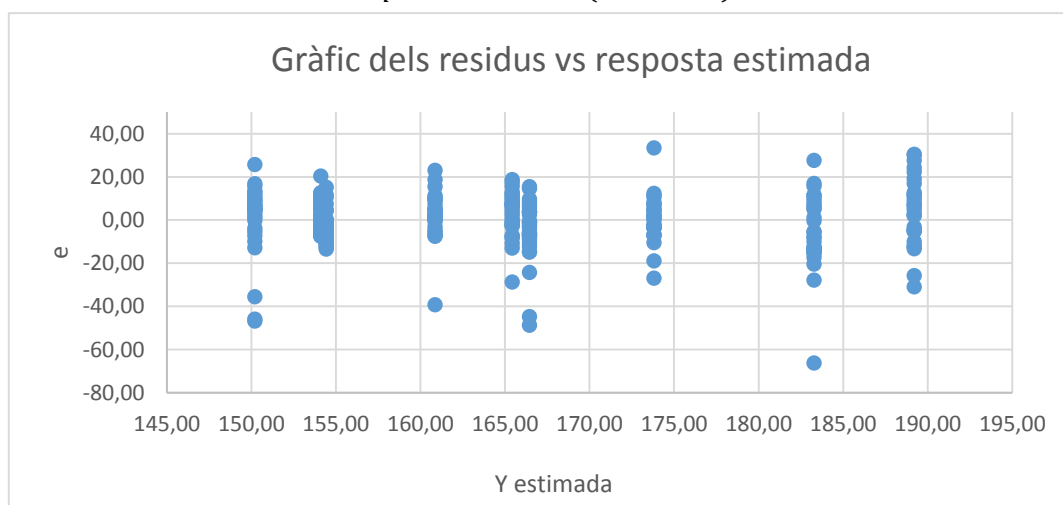


Figura 44: Residus vs resposta estimada (Mitjana T2)

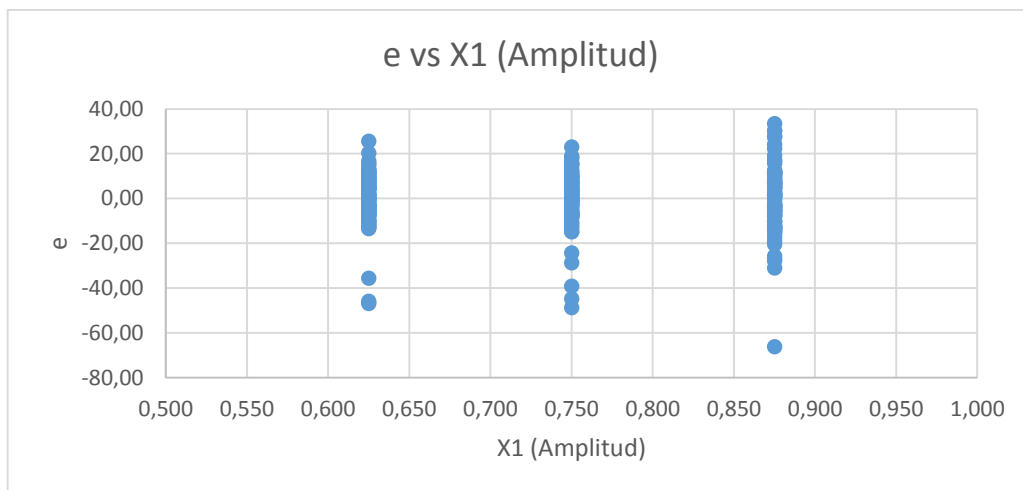


Figura 45: Residus vs Amplitud (Mitjana T2)

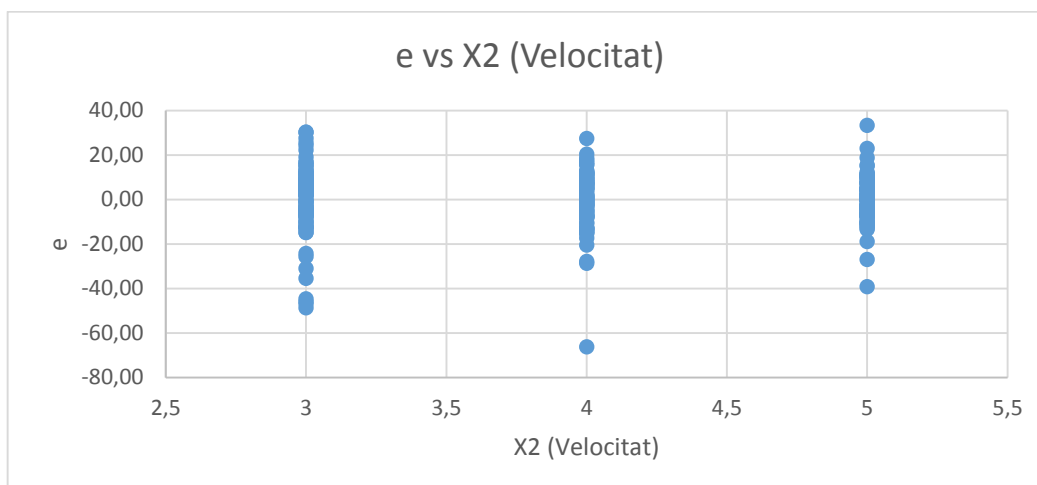
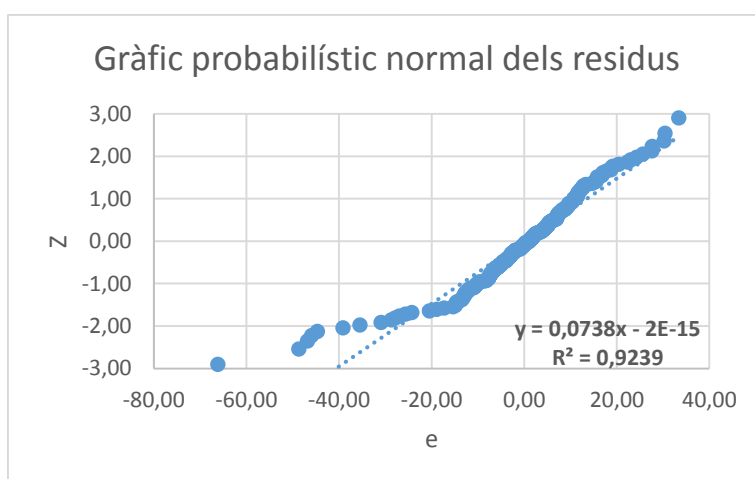


Figura 46: Residus vs Velocitat (Mitjana T2)



Ajust	
σ gràfic	σ dades
13,55	13,02
m gràfic	m dades
0,00	0,00

Figura 47: Ajust normal dels residus (Mitjana T2)

Als gràfics de residus s'observa com la variància sembla lleugerament inferior, tal com havíem vist, als punts de mínima amplitud i màxima velocitat. La prova d'ajust mostra un model de distribució normal acceptable, tot i que difereix lleugerament en els primers punts.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model calculat és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	5	43446,72	8689,343205	50,3164813	1,69604E-36
Residus	264	45591,16	172,6937769		
Total	270	89037,87314			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori els termes quadràtics corresponents a X_1^2 i X_2^2 no són significatius al model final.

	Coeficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	165,44	0,018518519	1,788304478		
X1	14,59	0,005555556	0,979494702	14,8990086	7,53346E-37
X2	-2,79	0,005555556	0,979494702	-2,84681932	0,004762711
X1X2	-4,90	0,008333333	1,199631113	-4,08660347	5,81216E-05
X_1^2	3,26	0,016666667	1,69653459	1,92303771	0,055550917
X_2^2	-1,78	0,016666667	1,69653459	-1,04841167	0,295407827

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coeficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	166,43	0,003703704	0,803948163		
X1	14,59	0,005555556	0,984631389	14,8212825	1,2169E-36
X2	-2,79	0,005555556	0,984631389	-2,83196786	0,00497993
X1X2	-4,90	0,008333333	1,205922244	-4,06528422	6,32254E-05

$$\hat{Y} = 166,43 + 14,59X_1 - 2,79X_2 - 4,90X_1X_2$$

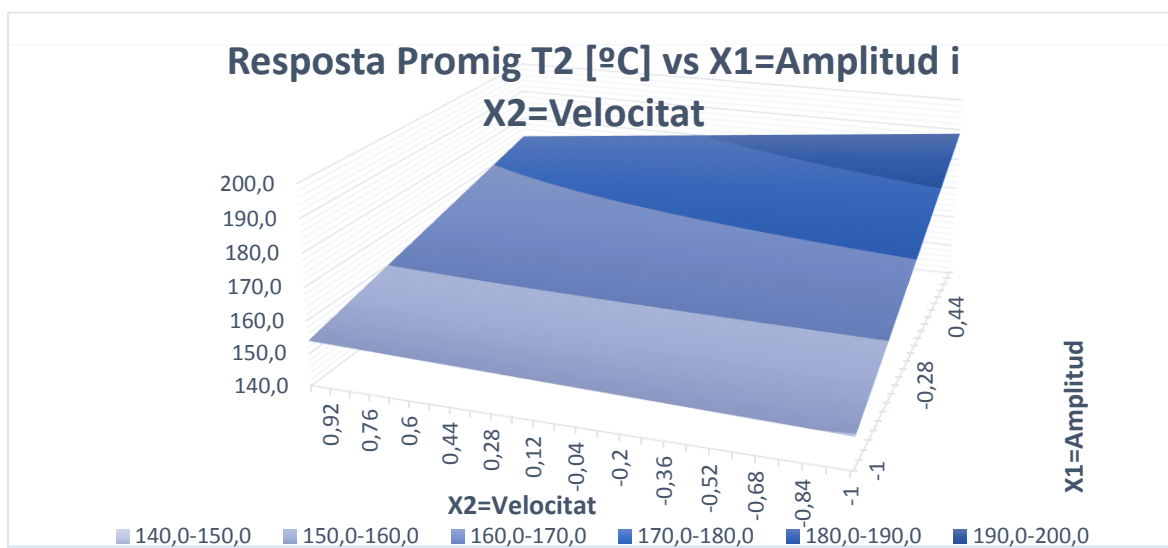


Figura 48: Superfície de resposta (Mitjana T2)

Descodificant les variables X1 i X2:

$$\hat{Y} = -27,55 + 273,52A + 26,61V - 39,20AV$$

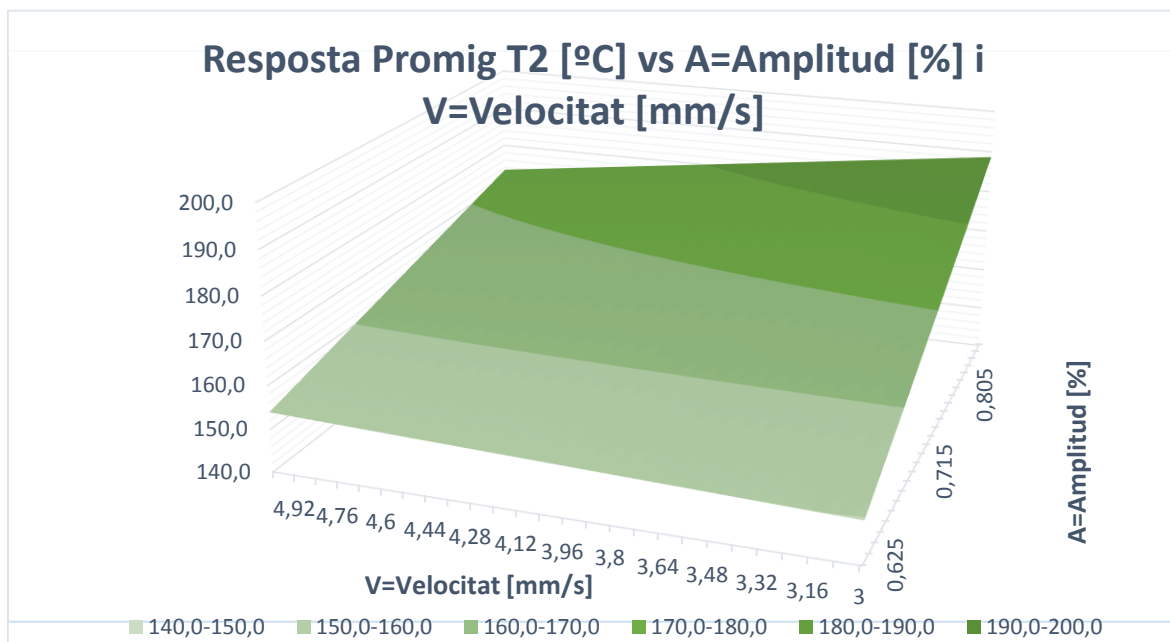


Figura 49: Superfície de resposta descodificada (Mitjana T2)

Transformant l'amplitud a micres:

$$\hat{Y} = -27,55 + 2,98A + 26,61V - 0,43AV$$

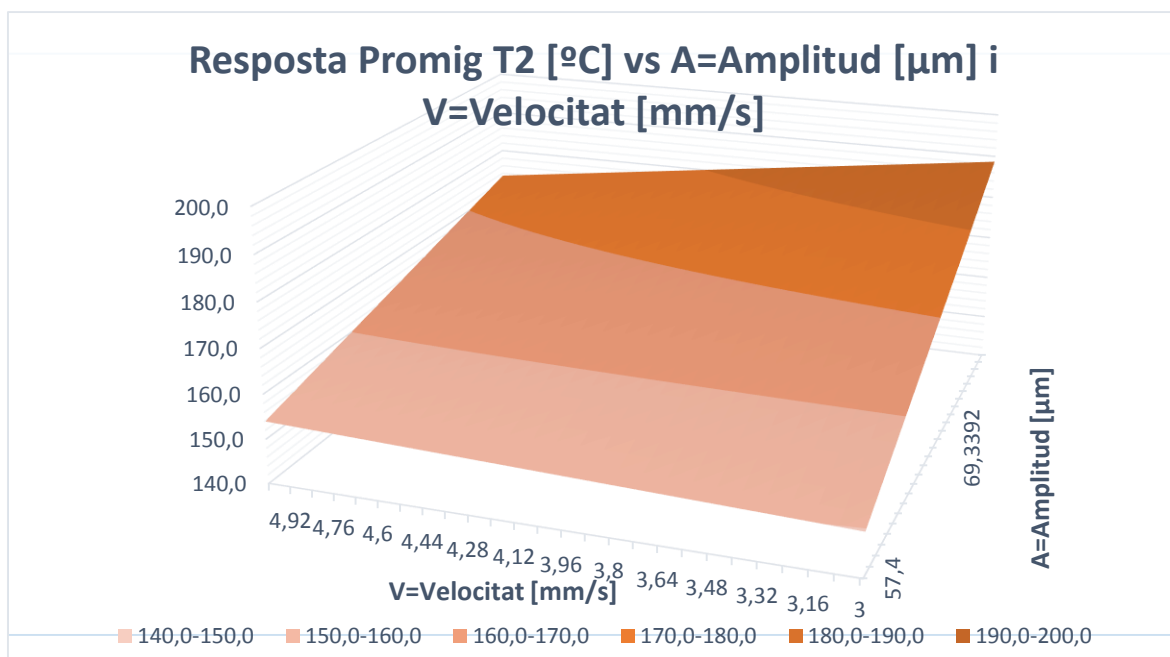


Figura 50: Superfície de resposta descodificada amb A en micres (mitjana T2)

La validació del model per a la resposta **Màxim T2** ha sigut la següent:

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

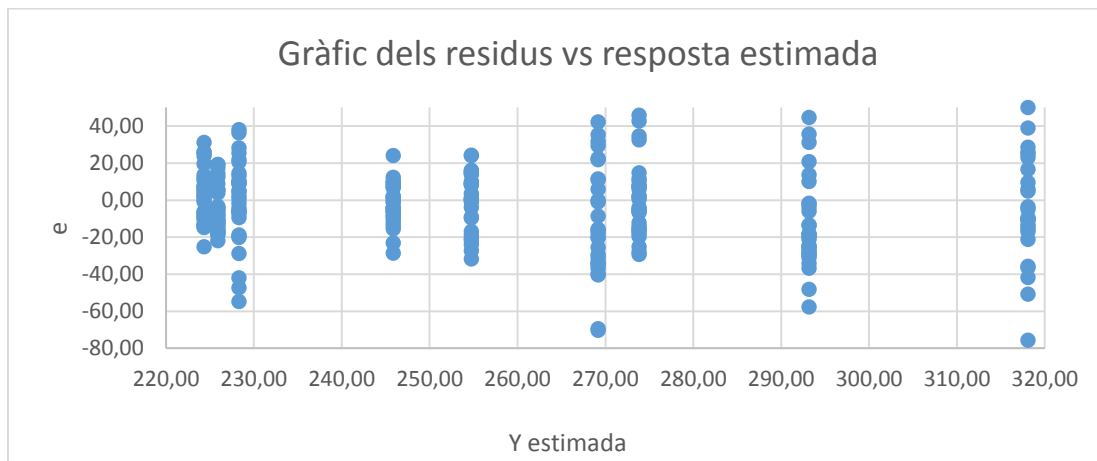


Figura 51: Residus vs resposta estimada (Màxim T2)

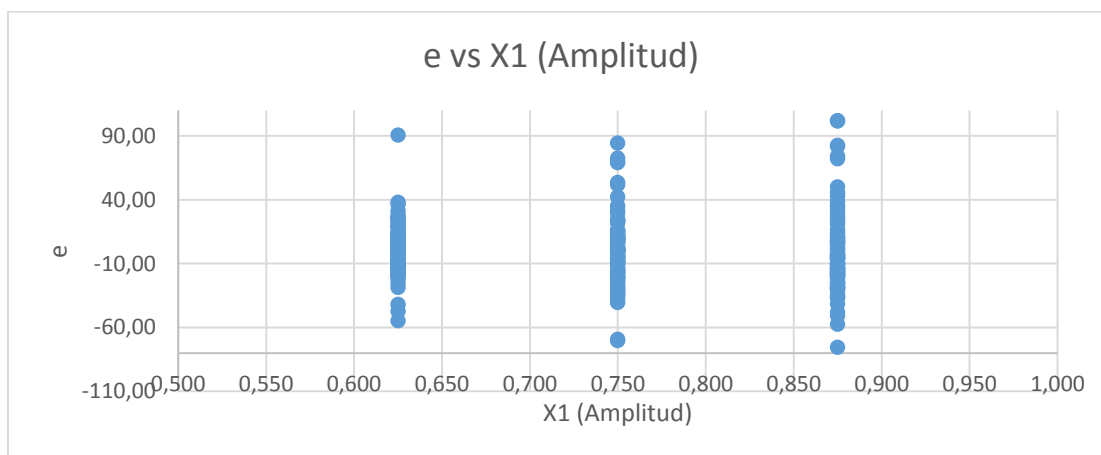


Figura 52: Residus vs Amplitud (Màxim T2)

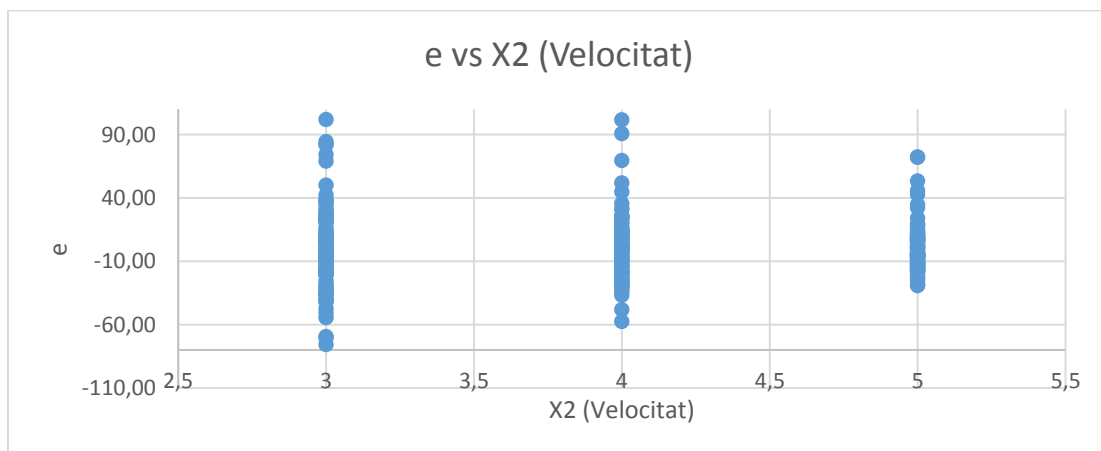
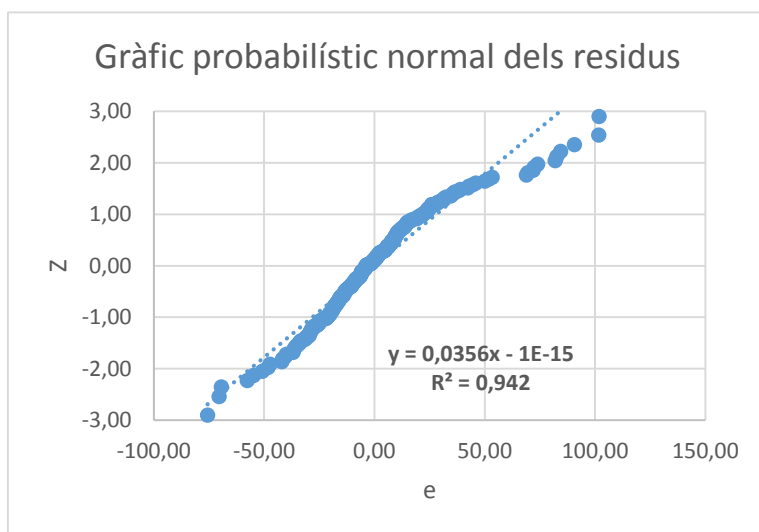


Figura 53: Residus vs Velocitat (Màxim T2)



Ajust	
σ gràfic	σ dades
28,09	27,23
m gràfic	m dades
0,00	0,00

Figura 54: Ajust normal dels residus (Màxim T2)

En aquest cas, es pot apreciar com s'accentua la dispersió en els punts d'amplitud alta i velocitat baixa. Per tant, en els punt on la temperatura és més alta, es té major dispersió. Sembla probable la hipòtesi plantejada de que en punts on el material es troba sobreescalfat, per sobre del seu punt de fusió, la dispersió dels valors de temperatura és major.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	5	252335,00	50467,00099	66,8173091	6,4082E-45
Residus	264	199398,76	755,2983154		
Total	270	451732,9185			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori els termes quadràtics corresponents a X_1^2 i X_2^2 no són significatius al model final.

	Coefficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	254,76	0,018518519	3,739920566		
X1	34,42	0,005555556	2,048438857	16,8038265	1,36821E-43
X2	-11,67	0,005555556	2,048438857	-5,69517717	3,27942E-08

X1X2	-10,46	0,008333333	2,508814985	-4,170362	4,12862E-05
X1^2	4,02	0,016666667	3,548000177	1,13245328	0,258471407
X2^2	2,77	0,016666667	3,548000177	0,78009516	0,436033696

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coefficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	259,28	0,003703704	1,672200532		
X1	34,42	0,005555556	2,048019026	16,8072712	1,07665E-43
X2	-11,67	0,005555556	2,048019026	-5,69634465	3,23732E-08
X1X2	-10,46	0,008333333	2,508300798	-4,17121689	4,10505E-05

$$\hat{Y} = 166,43 + 14,59X_1 - 2,79X_2 - 4,90X_1X_2$$

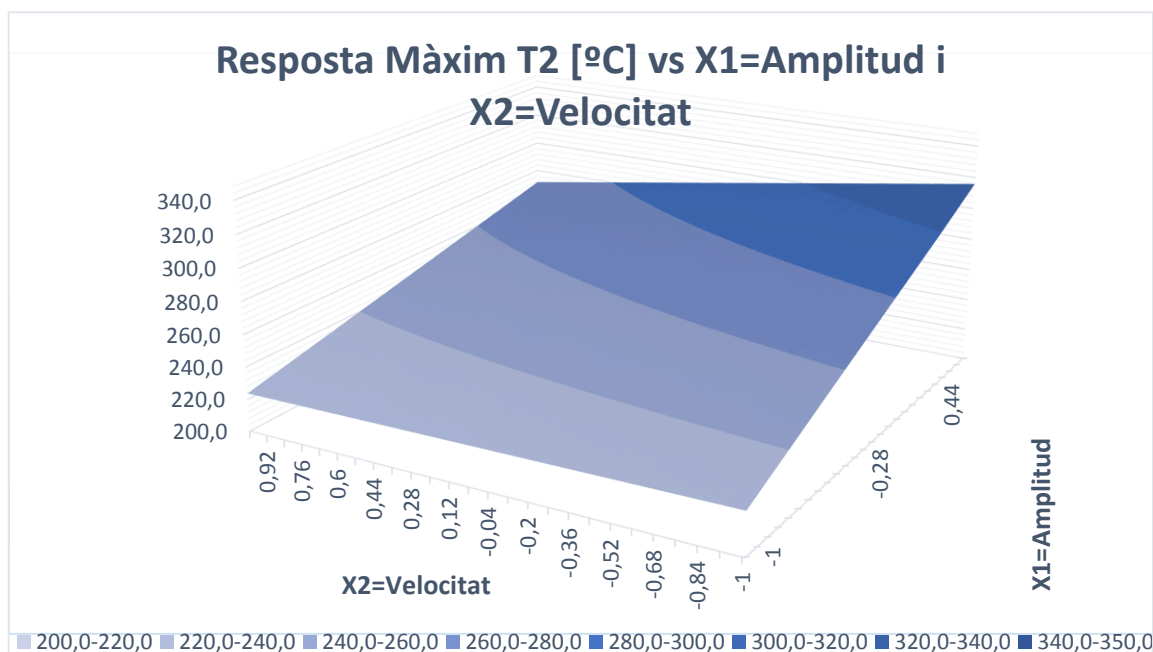


Figura 55: Superfície de resposta (Màxim T2)

Descodificant les variables X1 i X2:

$$\hat{Y} = -151,60 + 610,08A + 51,09V - 83,68AV$$

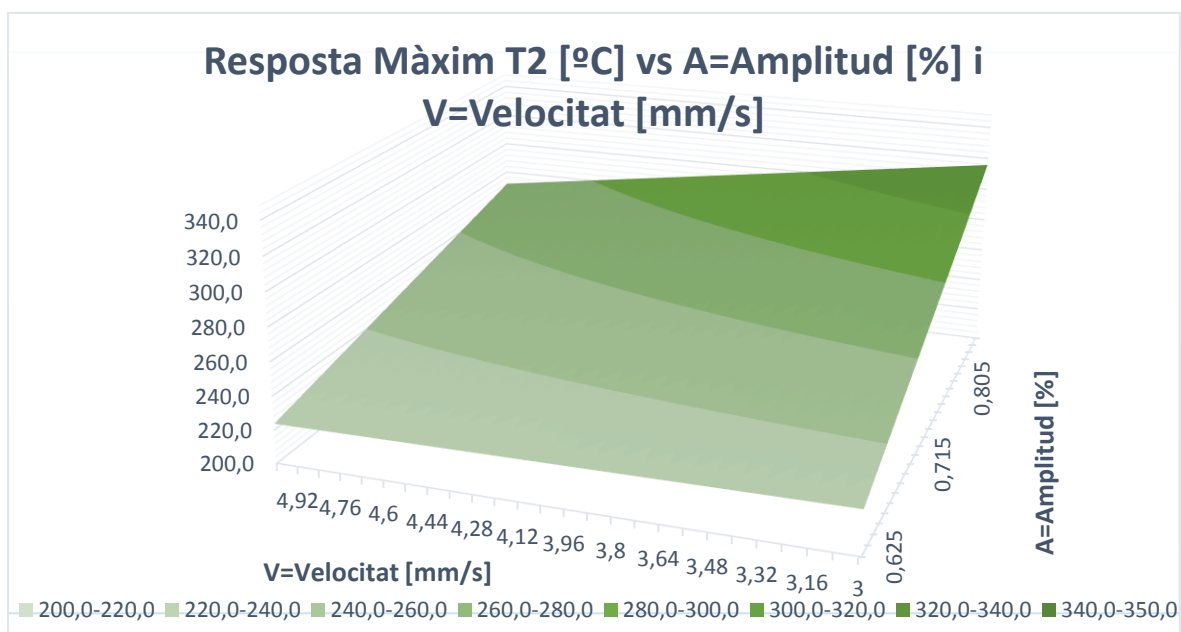


Figura 56: Superfície de resposta descodificada (Màxim T2)

Transformant l'amplitud a micres:

$$\hat{Y} = -151,60 + 6,64A + 51,09V - 0,91AV$$

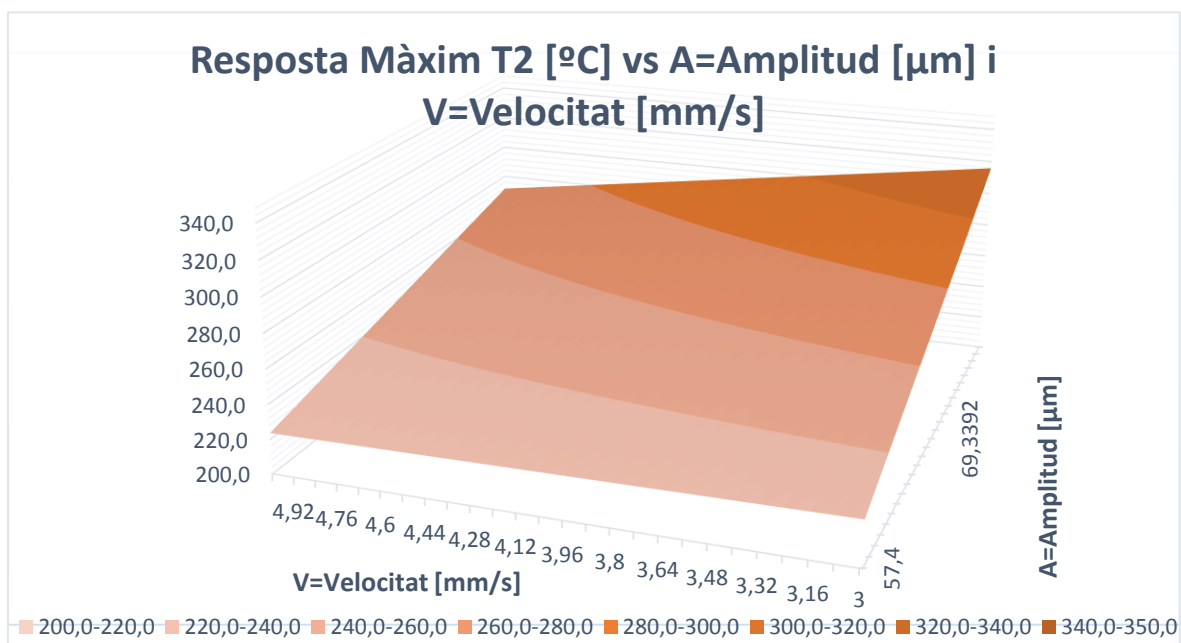


Figura 57: Superfície de resposta descodificada amb A en micres (Màxim T2)

8.3 DoE 3: Influència del motlle

L'experiment s'ha realitzat en el motlle frame sensoritzat, amb l'objectiu de disminuir el volum de plàstic injectat i veure si la tipologia del flux en arribar al sensor podria estar produint part de la dispersió dels experiments anteriors.

L'experimentació s'ha realitzat amb el booster green (1:1), sonotrode de diàmetre 8mm i material PP ELTEX blau, MFR=3g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada oberta.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
20	0,6-0,8-1	2500	3-4-5	2,75	3000	3

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
2	3	8	30	240

Aquest experiment s'ha centrat en valorar el nivell de dispersió que resulta en cada punt experimental, i correlacionar-ho amb els nivells dels factors i la resultant de temperatura.

L'últim punt que correspondria al d'amplitud i velocitat més baixes no ha pogut ser estudiat, ja que la repetibilitat d'omplir peça era massa baixa, amb el conseqüent esbiaixat dels resultats.

El primer anàlisi correspon a l'estudi directe dels diferents punts experimentals obtinguts, valorant la dispersió de les respostes i l'ajust normal d'aquestes, així com la tendència general a la que indueix cada factor.

A	V	Promig Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
1	5	265,40	8,80
0,8	5	230,12	5,04
0,6	5	212,91	5,24
1	4	257,68	9,60
0,8	4	226,56	7,21
0,6	4	206,91	5,06

1	3	237,91	6,88
0,8	3	225,66	7,30
0,6	3	-	-

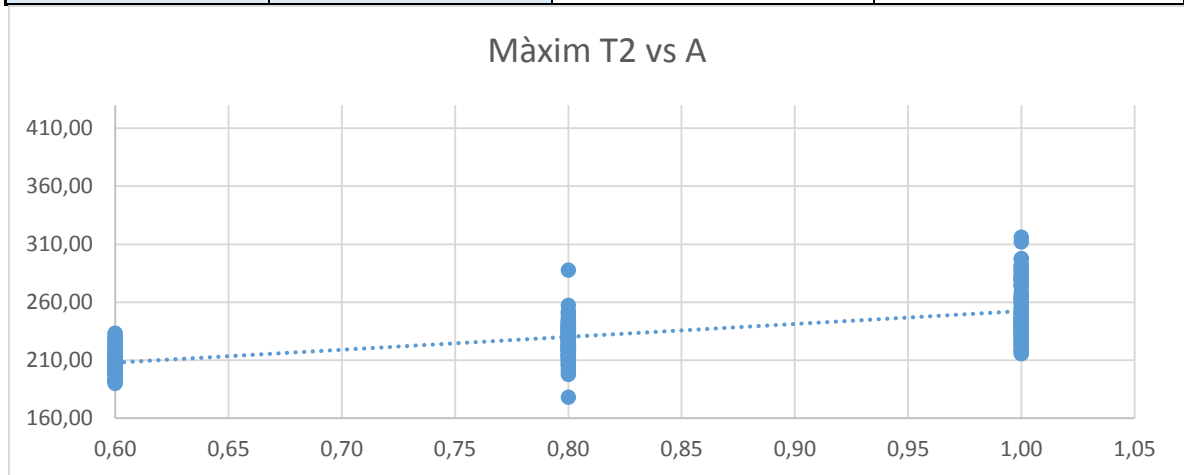


Figura 58: Màxim T2 vs A

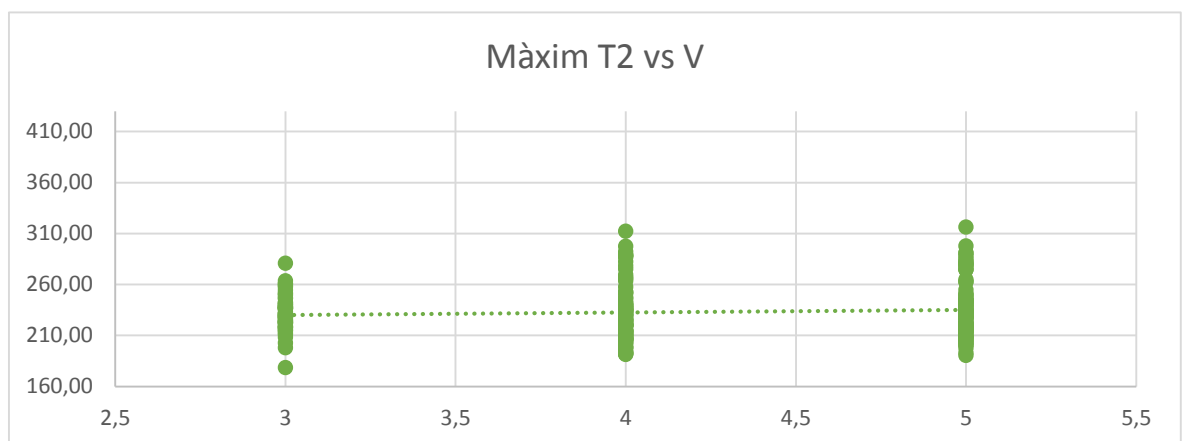


Figura 59: Màxim T2 vs V

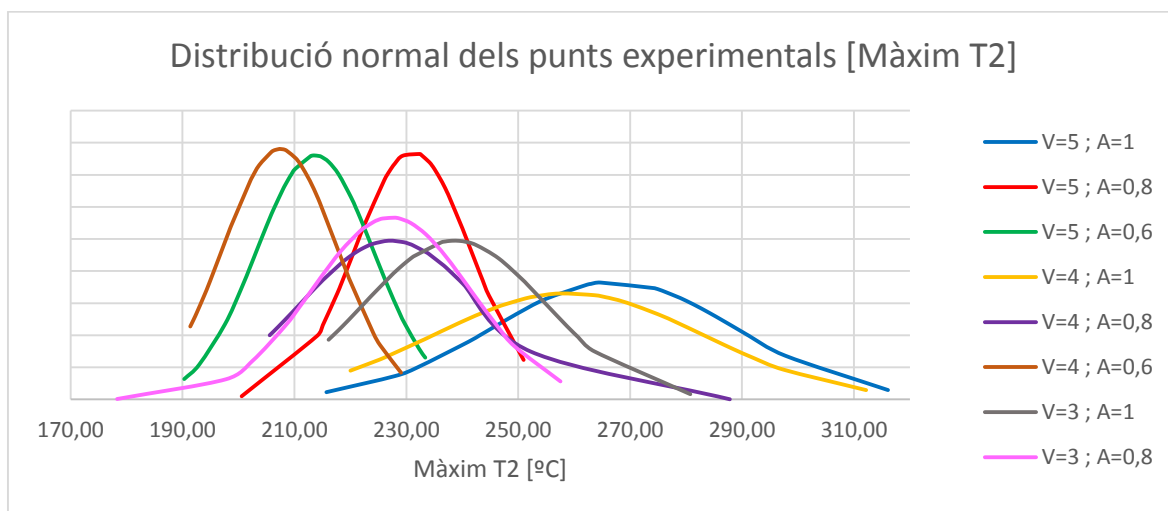


Figura 60: Distribució normal dels punts experimentals

S'observa com s'ha obtingut una reducció significativa de la desviació en la resposta de temperatura. Els punts de menor desviació es troben a la mínima amplitud (60%) i velocitats mitges-altes (4 i 5 mm/s), i també a amplitud mitja (80%) i velocitat alta (5 mm/s). En quant als altres punts, no es pot veure una tendència clara, però sí s'observa que punts amb mitjanes de temperatura més altes solen tenir una dispersió major que els punts amb mitjanes de temperatura sensiblement menors, tot i que no és extrapolable a la totalitat dels casos.

Seguidament es valida estadísticament el model:

$$\text{Hipòtesi 1: } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$$

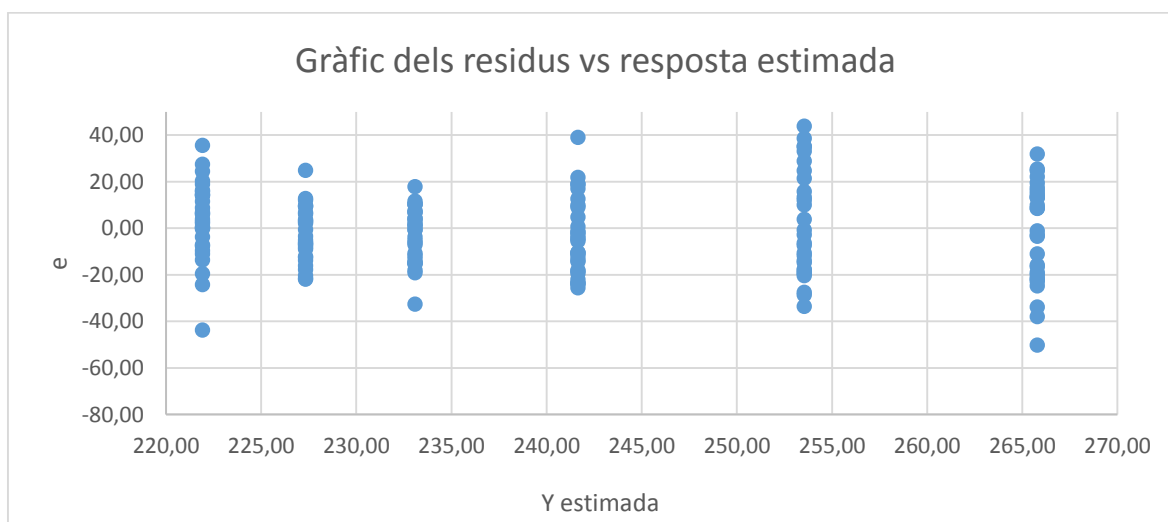


Figura 61: Residus vs resposta estimada

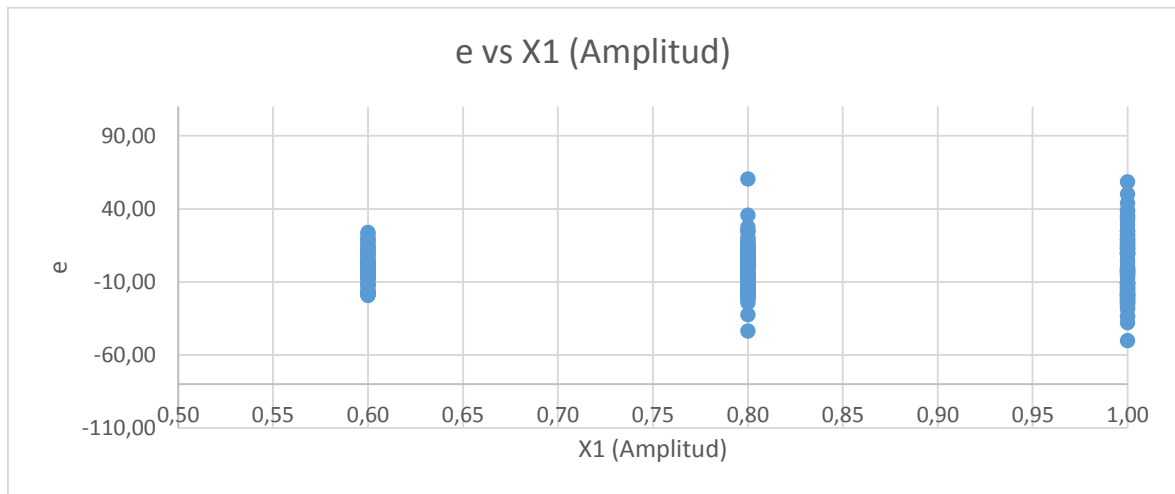


Figura 62: Residus vs Amplitud

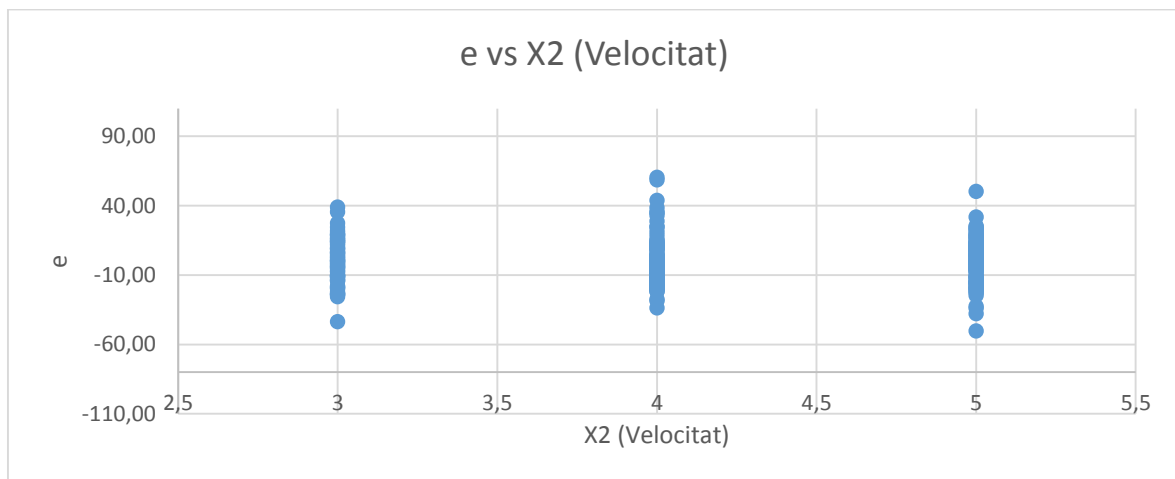
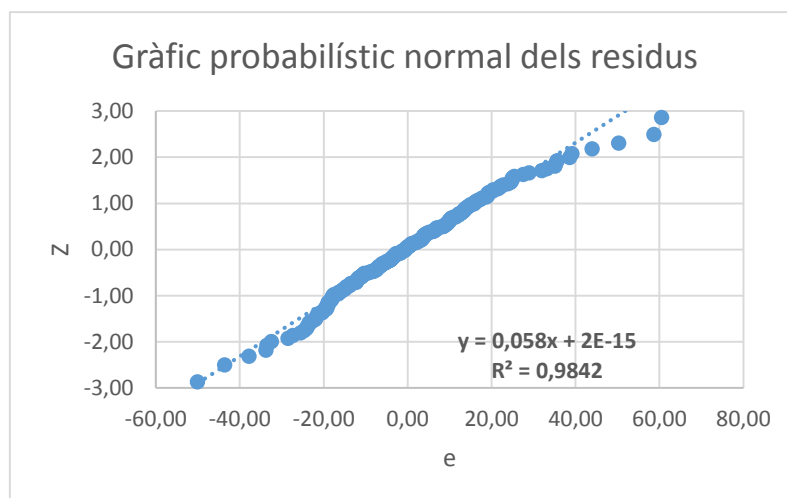


Figura 63: Residus vs Velocitat



Ajust	
σ gràfic	σ dades
17,24	17,11
m gràfic	m dades
0,00	0,00

Figura 64: Ajust normal dels residus

Als gràfics de residus s'observa com la variància es veu significativament reduïda en els punts d'amplitud més baixa. La distribució normal dels residus s'observa acceptable.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model calculat és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	5	83825,45	16765,09025	56,089421	3,68397E-38
Residus	234	69942,44	298,899328		
Total	240	153767,894			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori els terme quadràtics corresponents a X_1^2 i X_2^2 no són significatius al model final.

	Coefficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	227,33	0,020634921	2,483498321		
X1	21,64	0,01031746	1,756098504	12,3244253	3,15046E-27
X2	5,59	0,01031746	1,756098504	3,18228434	0,001659233
X1X2	6,48	0,019047619	2,386068007	2,71456758	0,007130554
X1 ²	4,58	0,02142857	2,530807302	1,80868317	0,071783801
X2 ²	0,17	0,02142857	2,530807302	0,06793428	0,945895962

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coefficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	229,92	0,005050505	1,22966187		
X1	22,51	0,008585859	1,603282924	14,0377122	5,51786E-33
X2	6,45	0,008585859	1,603282924	4,0241957	7,69404E-05
X1X2	5,18	0,015151515	2,129836835	2,4329862	0,015715674

$$\hat{Y} = 229,92 + 22,51X_1 + 6,45X_2 + 5,18X_1X_2$$

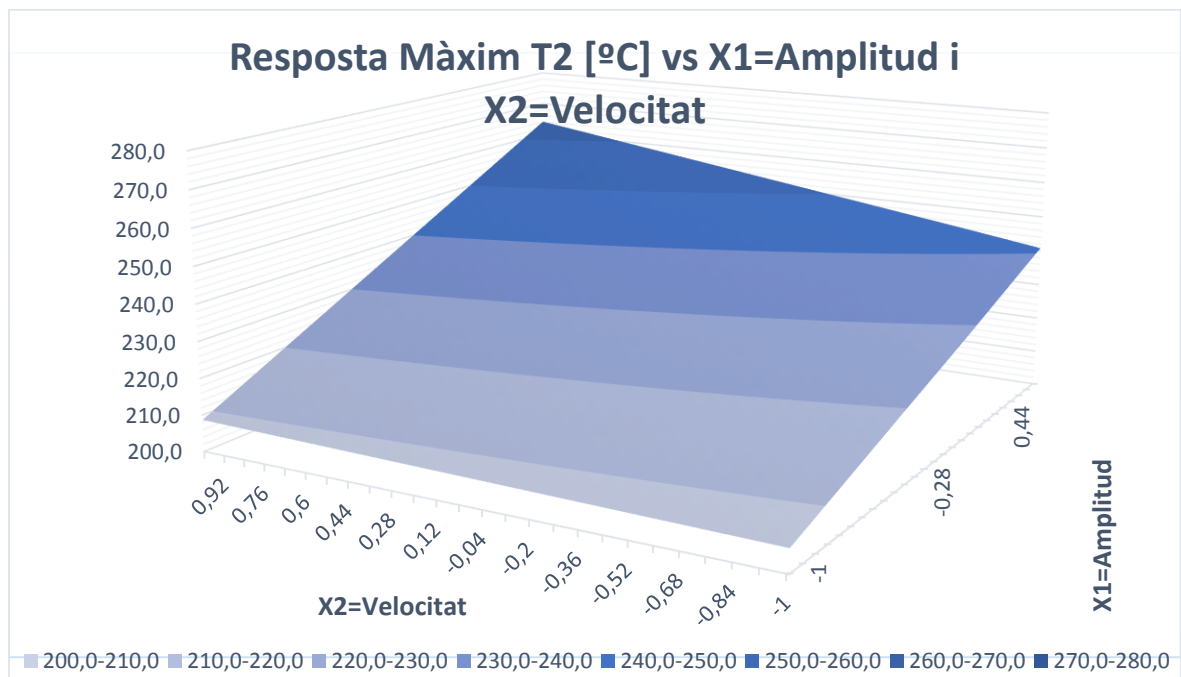


Figura 65: Superfície de resposta

Descodificant les variables X1 i X2:

$$\hat{Y} = -27,55 + 273,52A + 26,61V - 39,20AV$$

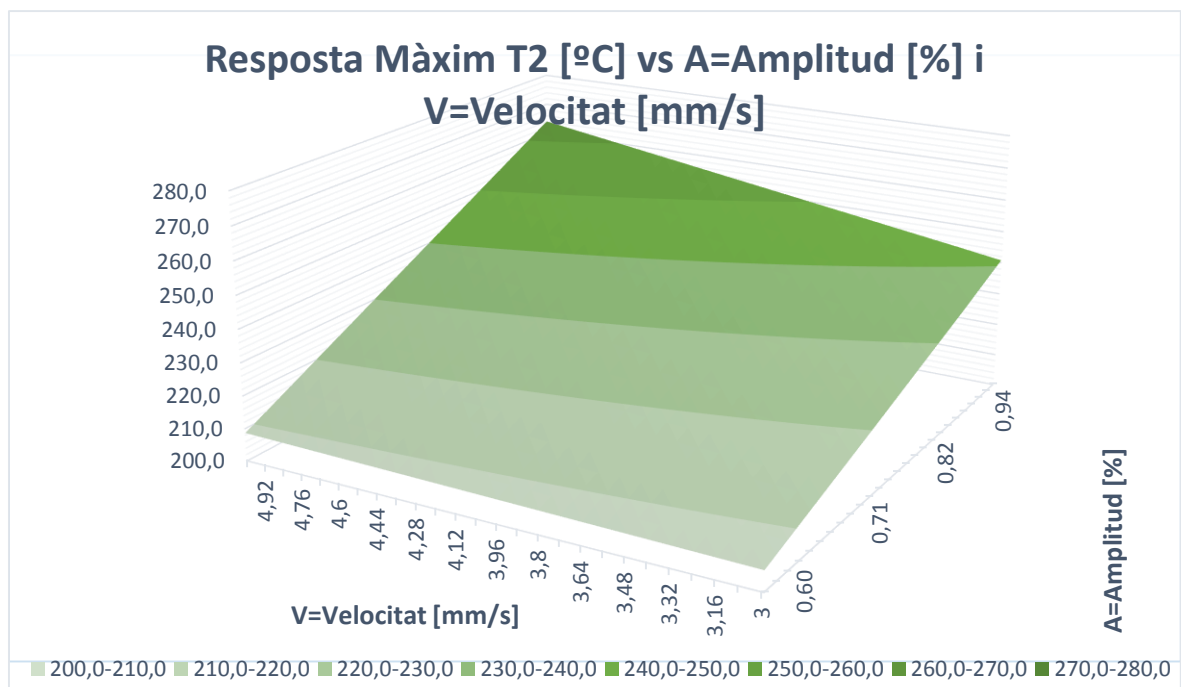


Figura 66: Superfície de resposta descodificada

Transformant l'amplitud a micres:

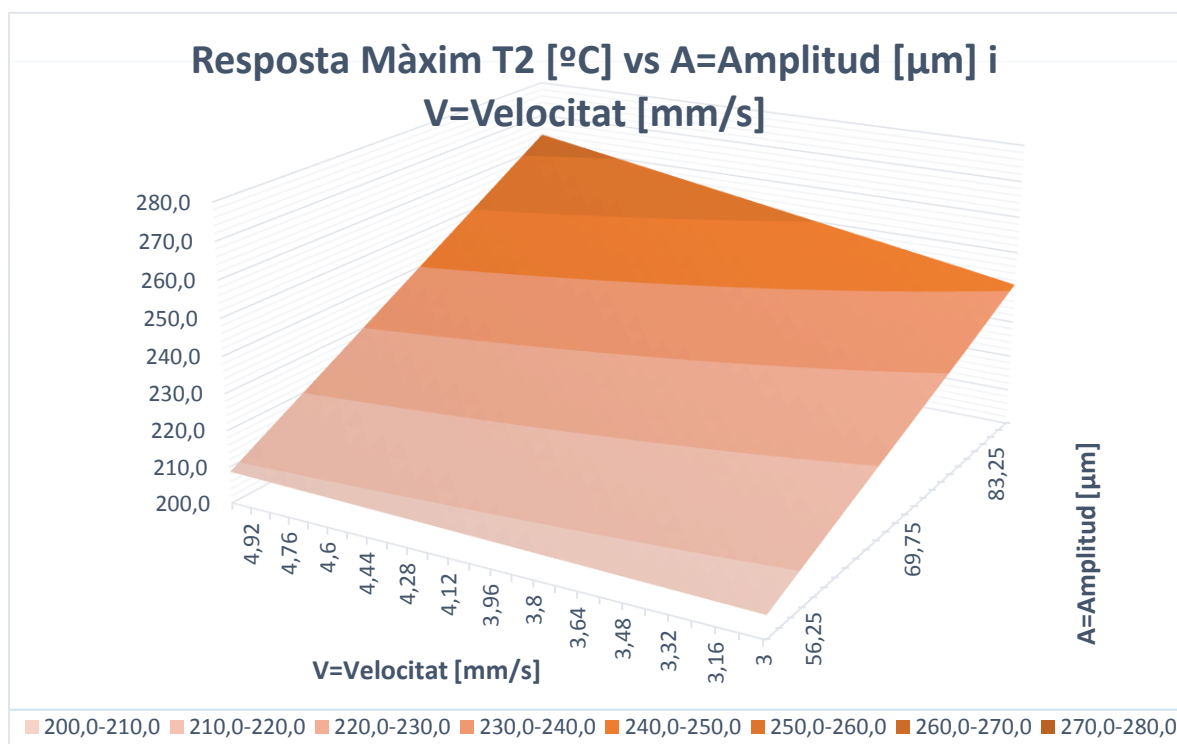


Figura 67: Superfície de resposta descodificada amb A en micres

8.4 DoE 4: Influència de la massa de dosificació

L'experiment s'ha realitzat en el motlle frame sensoritzat, variant la massa de dosificació en un pellet, a tres nivells diferents (19, 20 i 21 pellets). L'objectiu és descartar que un possible error del dosificador, que en les condicions actuals pot tenir una desviació de ± 1 pellet, pugui estar produint part de la incertesa en la resposta.

Els útils utilitzats han sigut el booster green 1:1, sonotrode de diàmetre 8mm i material PP ELTEX blau, MFR=3g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada oberta.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
19-20-21	0,8	2500	5	2,5	2500	2

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]

1	3	3	30	90
---	---	---	----	----

Seguidament, s'avaluen els punts experimentals mesurats, centrant l'estudi en la dispersió de les respostes en funció de cada factor de control, i la distribució normal resultant.

Pellets	Mitjana Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
21	225,12	5,29
20	228,99	5,84
19	231,67	5,25

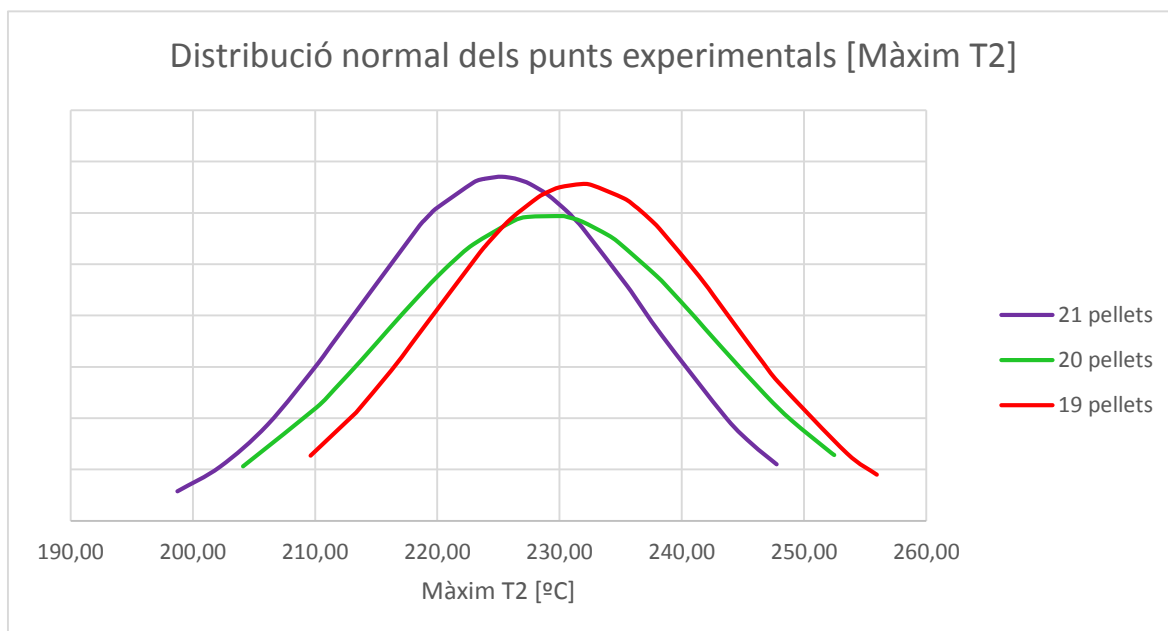


Figura 68: Distribució normal dels punts experimentals (Màxim T2)

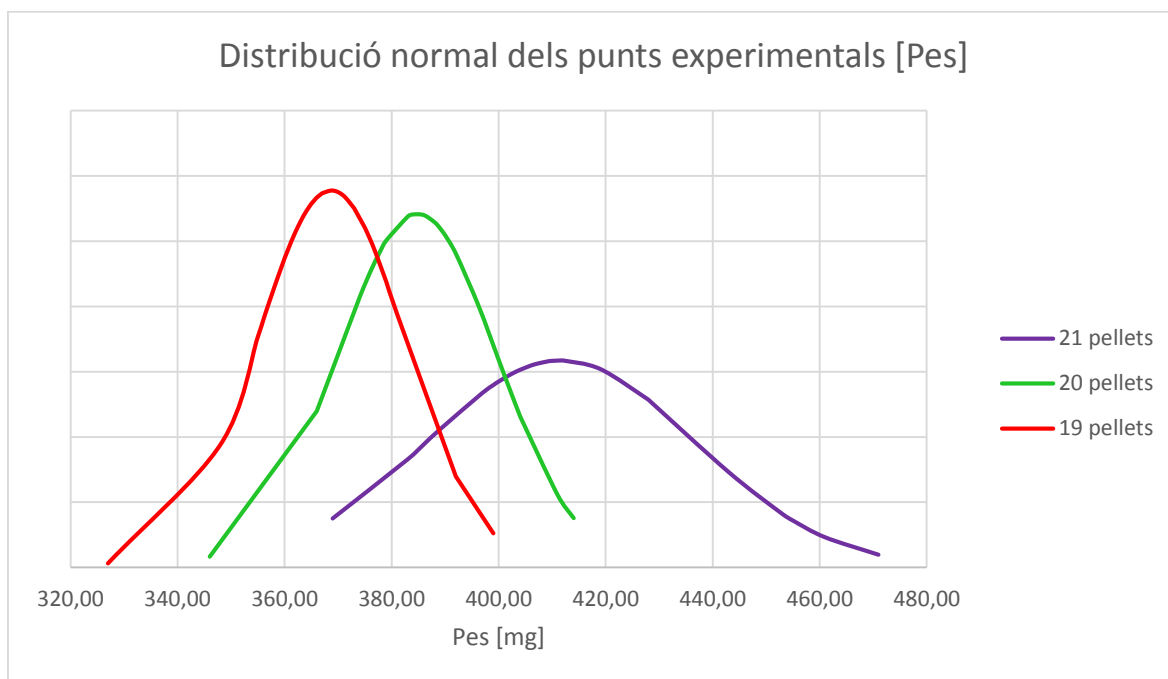


Figura 69: Distribució normal dels punts experimentals (Pes)

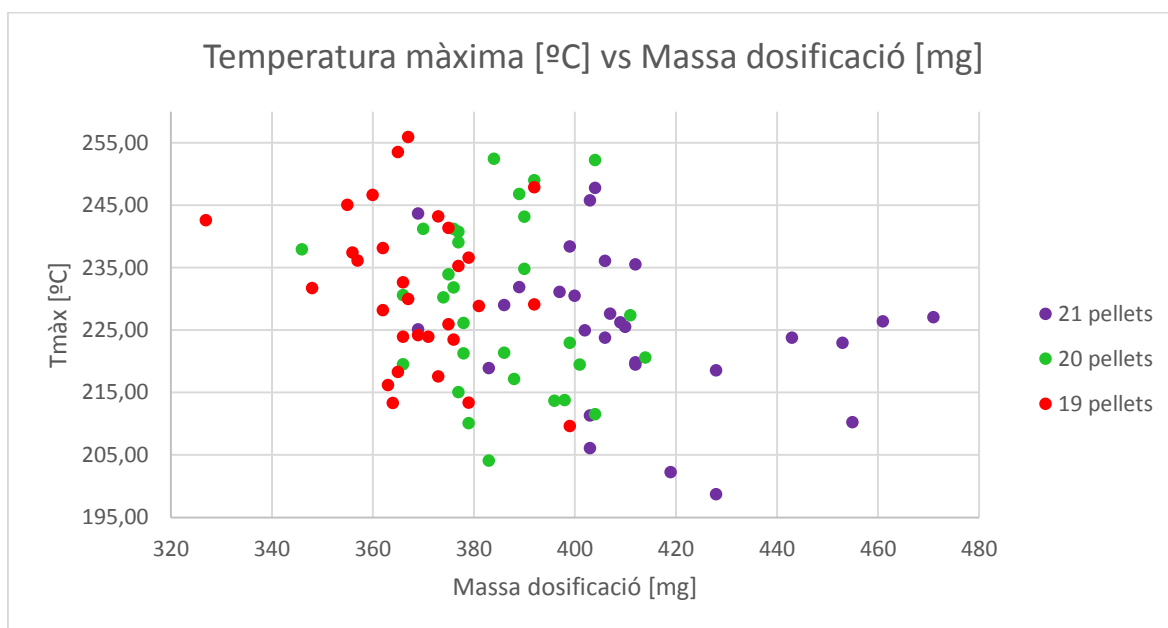


Figura 70: Temperatura Màxima vs Massa de dosificació

En quant a la dispersió, no s'observa cap diferència significativa en els tres punts experimentals estudiats.

Si ens fixem en els valors mitjans del màxim de temperatura versus la massa de dosificació, no s'observa cap relació entre elles, com ses pot veure al gràfic anterior.

El que si que s'observa és una relació clara entre la força de la màquina y la massa dosificada.

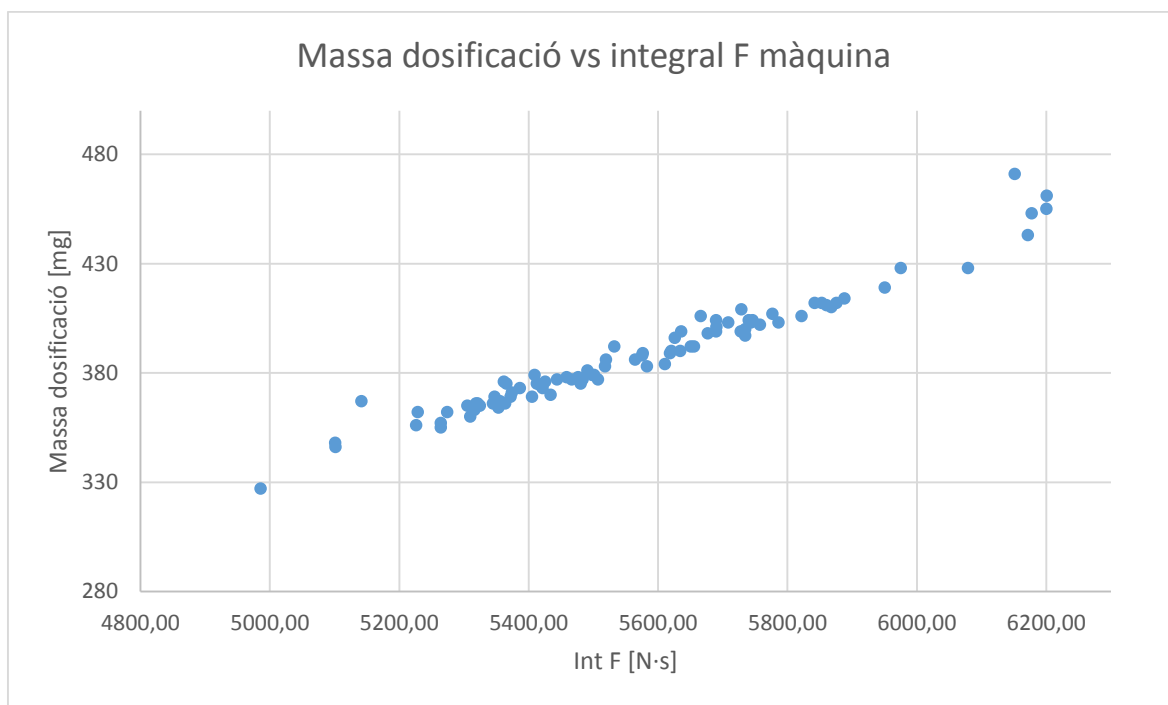


Figura 71: Relació entre la massa dosificada i la integral de la força de la màquina

8.5 DoE 5: Influència del volum de pellet

L'objectiu de l'experiment és estudiar l'efecte de diferents dimensions de pellet en quant a la temperatura màxima resultant i si hi ha alguna relació amb la dispersió que s'obté. Això tindria encara més rellevància en dosificacions petites, en les quals les dimensions entre pellets poden variar fins a un 50% en volum, depenent del fabricant.

Per això, l'experiment s'ha realitzat amb tres dimensions de pellets diferents, totes amb la mateixa massa de dosificació, i del mateix material.

En quant als útils, s'ha realitzat al motlle frame, amb el booster green (1:1), sonotrode de diàmetre 8mm i material PP COPO RANDOM MOPLER RP348R, de MFR=25g/10min. Les dosificacions han sigut de 400 mg de material. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada oberta.

Les dimensions de pellets utilitzades han sigut les següents:

DIMENSIONS PELLETS (calculades a partir de mostres)			
TIPUS PELLET	DIAMETRE [mm]	ALÇADA [mm]	VOLUM [mm ³]
GRANS	5,08	3,40	137,82
	4,98	3,48	135,57
	5,21	3,00	127,91
	5,13	3,14	129,80
	5,15	3,70	154,15
Mitjana	5,11	3,34	137,05
MITJANS	3,30	3,03	51,83
	3,65	3,16	66,13
	3,64	3,15	65,56
	3,33	3,10	54,00
	3,79	3,15	71,07
Mitjana	3,542	3,12	61,72
PETITS	1,70	3,13	14,21
	1,73	3,10	14,57
	1,70	3,10	14,07
	1,8	3,05	15,52
	1,63	3,05	12,73
Mitjana	1,71	3,09	14,22

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Tipologia de pellet	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
20	Grans-Mitjans-Petits	0,80	2500	5	2,5	2500	2

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
1	3	3	30	90

Dels punts experimentals obtinguts, s'estudia la següent informació:

Pellets	Mitjana Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
Grans	226,13	6,31
Mitjans	224,13	7,07
Petits	194,68	5,98

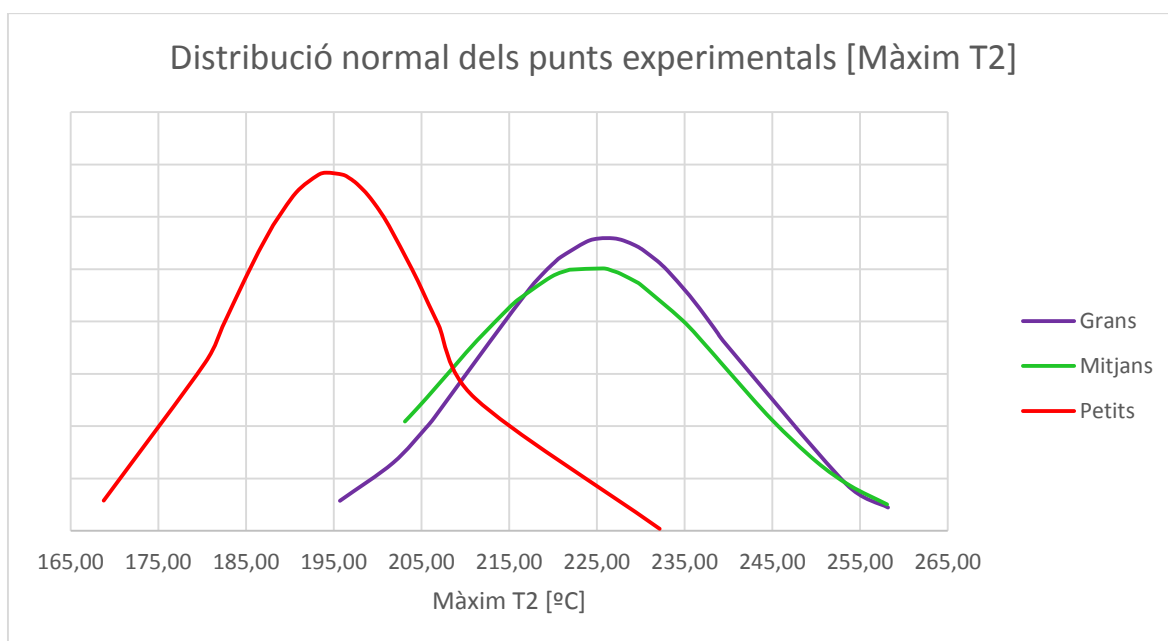


Figura 72: Distribució normal dels punts experimentals

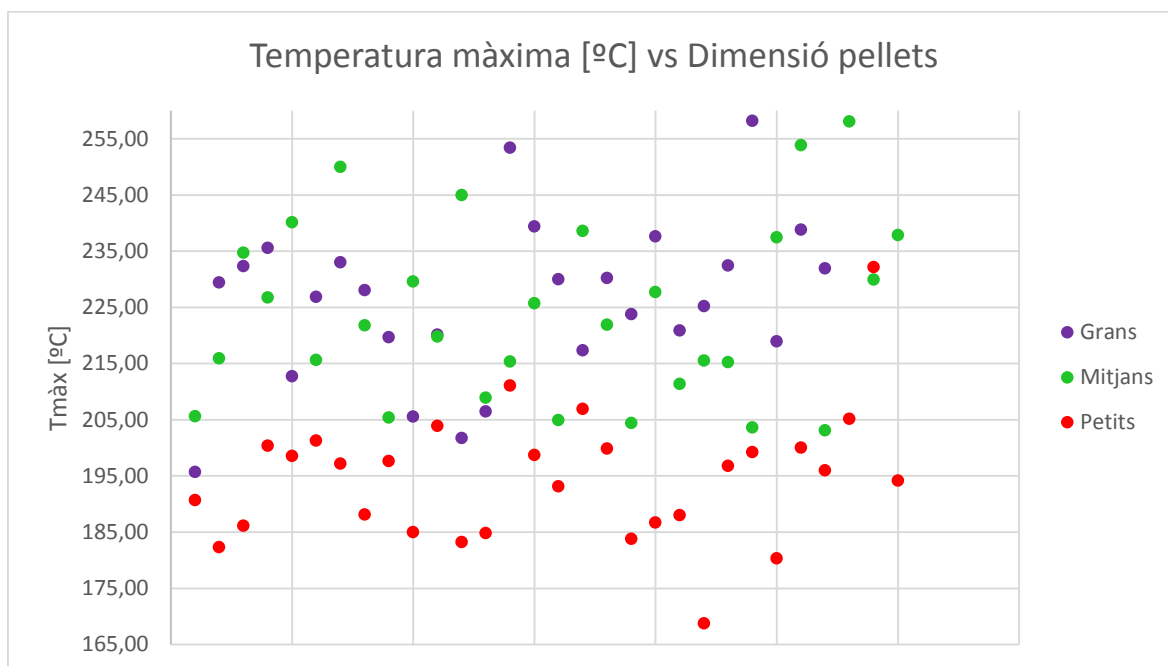


Figura 73: Temperatura màxima vs Dimensió de pellet

En quant a la desviació, no s'observa cap relació aparent amb la dimensió de pellet. No obstant, si que s'observa una clara disminució, en valor mitjà, del màxim de temperatura en el punt experimental amb pellets de volum menor. Per tant, això indicaria que el volum de pellet és un factor molt important a tenir en compte, ja que en aquest experiment ha suposat variacions de temperatura de més de 30 °C.

8.6 DoE 6: Influència del mètode d'injecció

L'experiment és una rèplica del DoE 2, on s'estudiava el màxim de temperatura com a resposta, variant l'amplitud i la velocitat, però aquest cop s'alliberarà la velocitat, agafant aquesta el valor que sigui necessària per avançar amb el nivell de força fixat. Per tant, és realitzarà l'experiment amb 2 nivells d'amplitud i 3 de força, que seran els factors de control a estudiar.

L'experimentació s'ha realitzat amb el booster green (1:1), sonotrode de diàmetre 8mm i material PP ELTEX blau, MFR=3g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri d'entrada oberta.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]
20	0,75-1	1000-1600-2200	200	4	0	0

Els paràmetres experimentals han sigut els següent

Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
2	2 i 3	6	30	180

Es farà un estudi tant de la dispersió com de els efectes dels paràmetres en el valor màxim de temperatura obtingut, i es compararà amb el mètode d'injecció per velocitat.

Les mitjanes i desviacions dels punts experimentals, així com l'ajust normal dels residus, es representen a continuació:

A	F	Promig Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
1	2200	273,58	14,21
0,75	2200	290,59	5,89
1	1600	266,07	12,09
0,75	1600	271,07	8,08
1	1000	274,51	8,03
0,75	1000	257,02	8,85

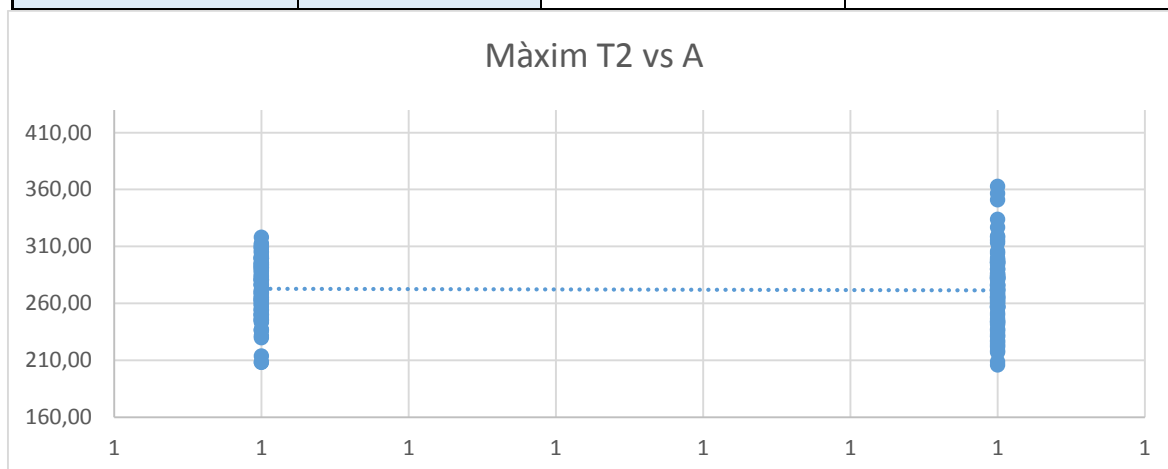


Figura 74: Màxim T2 vs A

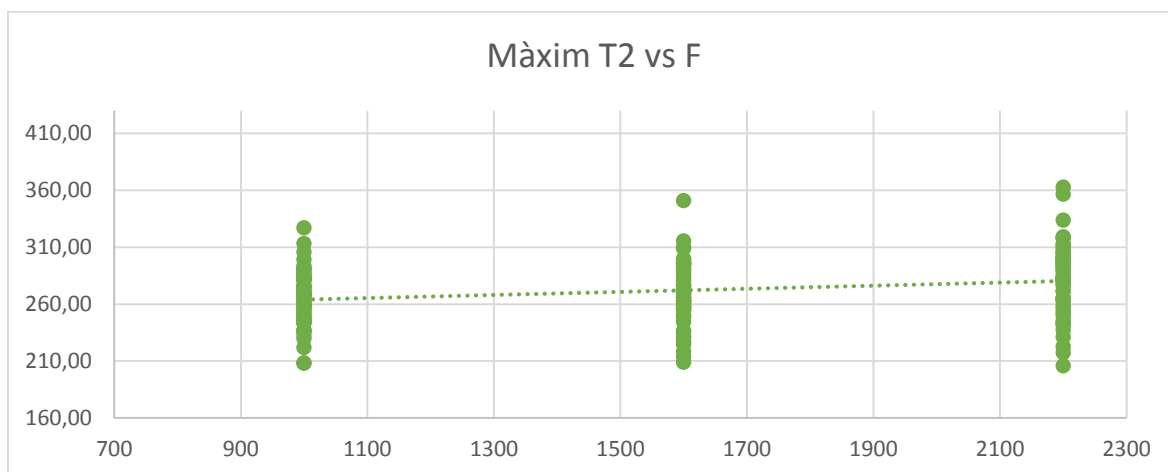


Figura 75: Màxim T2 vs F

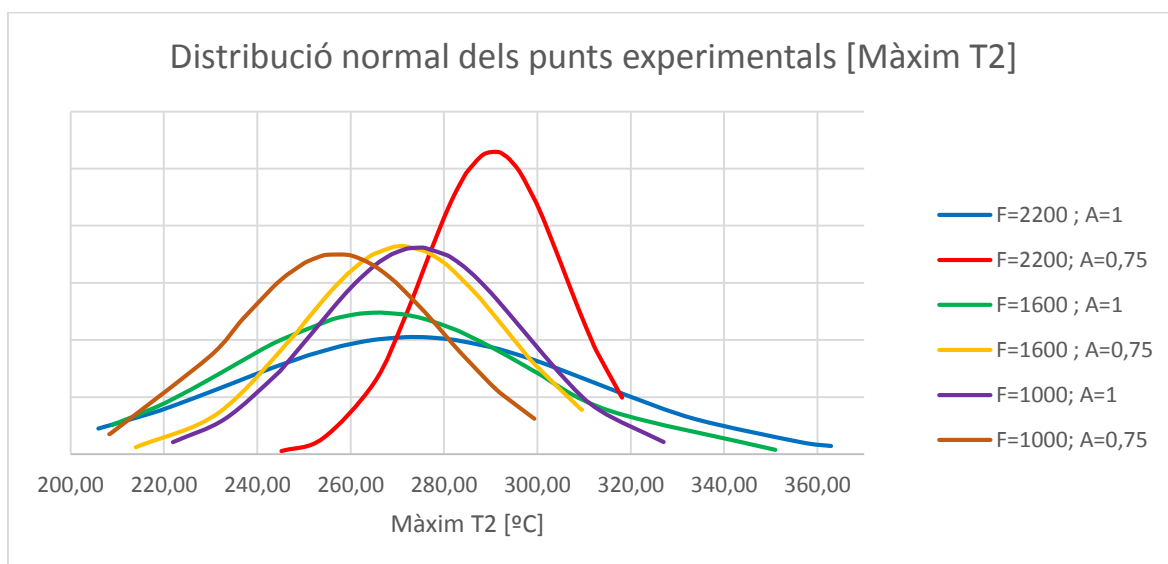


Figura 76: Distribució normal dels punts experimentals

Es pot observar com els valors de temperatura són una mica elevats pel que seria una transformació òptima del polipropilè. En quant a tendències que es puguin veure, sembla que a baixa amplitud s'obté una menor dispersió en les respostes, tot i que en l'últim punt no es compleix, ja que són ambdues prou similars. No s'observa una tendència a obtenir valors de temperatura més alts en augmentar l'amplitud, en aquest cas.

En quant a la força, si que s'extreu que en augmentar el seu valor, augmenta la temperatura a la que s'arriba, fet que podria explicar-se per la major cisalla del material.

Seguidament es valida estadísticament el model:

Hipòtesi 1: $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 = ct)$

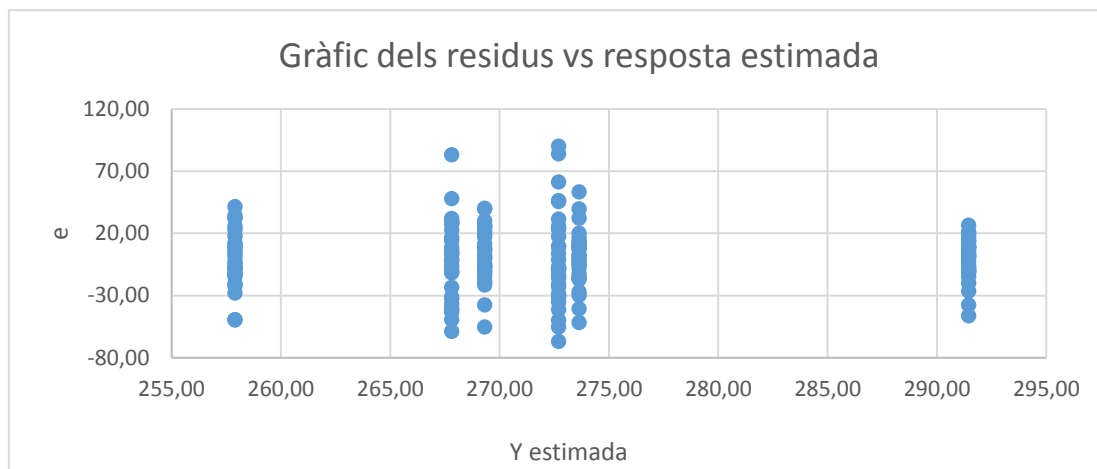


Figura 77: Residus vs resposta estimada

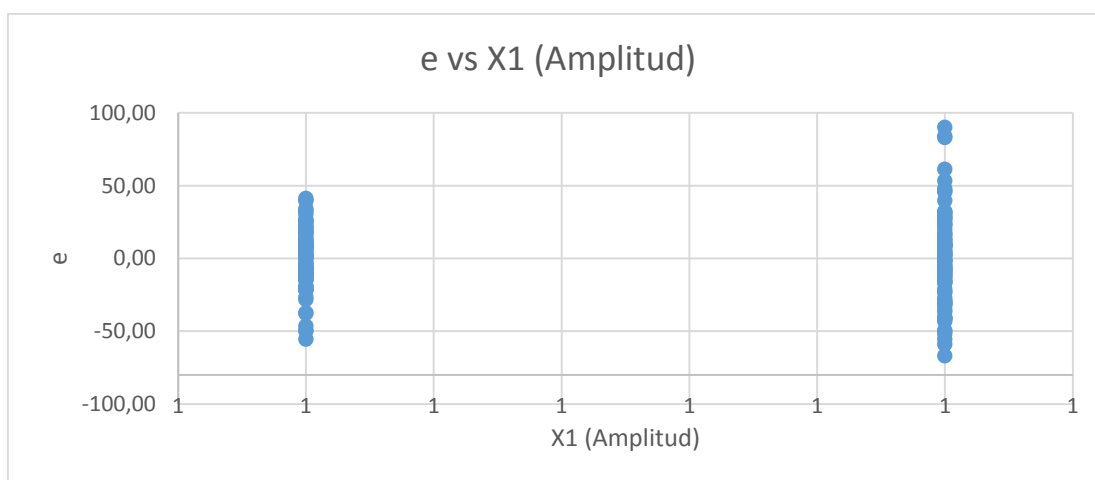


Figura 78: Residus vs Amplitud

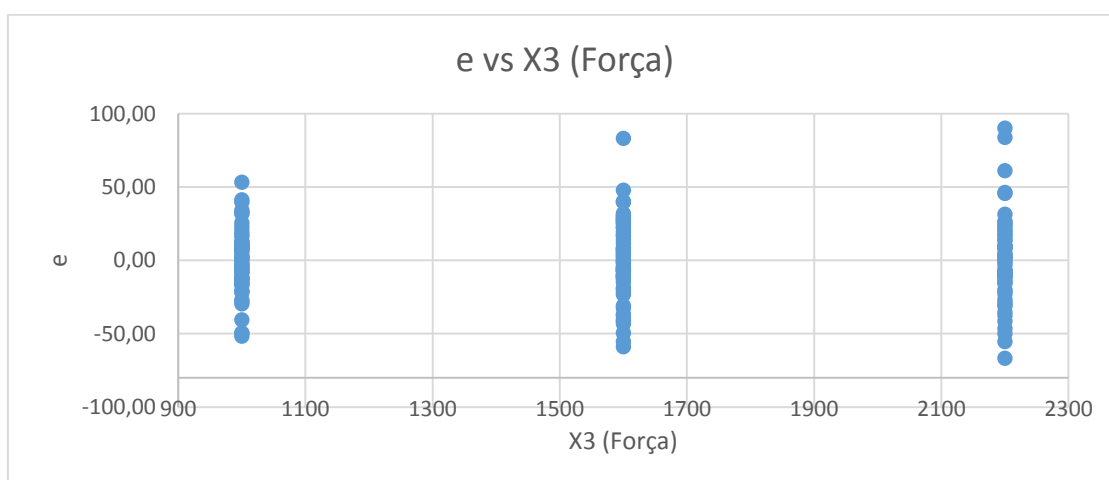
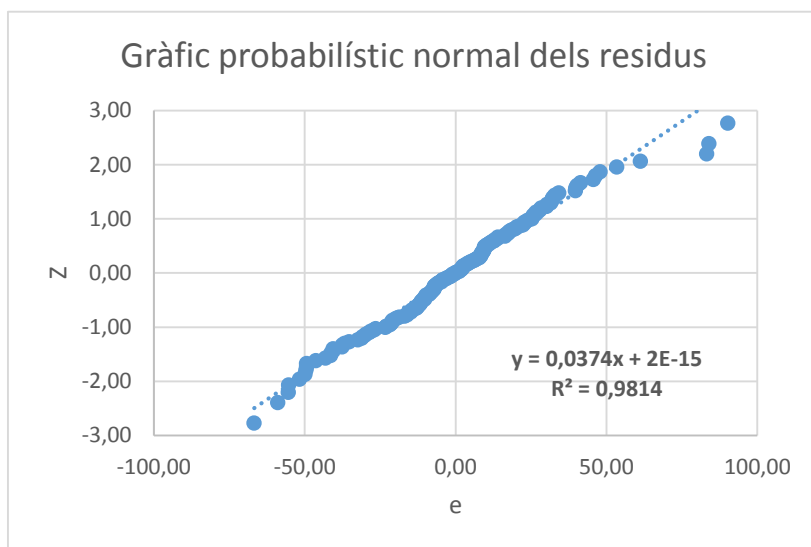


Figura 79: Residus vs Força



Ajust	
σ gràfic	σ dades
26,74	26,49
m gràfic	m dades
0,00	0,00

Figura 80: Distribució normal dels residus

Als gràfics de residus s'observa com a amplituds baixes, en general, es té menor desviació en la resposta. La distribució normal dels residus és acceptable, tot i que la variància és més petita als valors extrems que als centrals.

$$\text{Hipòtesi 2: } Y \sim N(m, \sigma^2 = ct) \rightarrow \hat{Y} \sim N(m, \sigma^2 = ct)$$

L'ANOVA ens indica que el model calculat és significatiu (normal i variància constant):

	v (graus)	SQ	QM	F Snedecor	p (F crit)
Regressió	4	18157,89	4539,473669	6,32509717	8,90724E-05
Residus	175	125596,16	717,6923213		
Total	180	143753,9108			

Estudiant la significació de cada terme, s'observa com a priori el terme lineal corresponent a X1 i el terme quadràtic corresponent a X3 no són significatius al model final.

	Coefficient β	diag (X'X) ⁻¹	Error tipus (S β_j)	T	p
Ord. Origen	268,57	0,016666667	3,458545748		
X1	-0,75	0,005555556	1,996792318	-0,37738304	0,70634624
X3	8,16	0,008333333	2,445561151	3,33618046	0,001037253
X1X3	-8,62	0,008333333	2,445561151	-3,52563937	0,000539345
X3 ²	5,35	0,02500000	4,235836167	1,26401647	0,207905176

S'extreuen els termes associats als factors no significatius, i s'itera tot el procés, obtenint el model final:

	Coefficient β	diag $(X'X)^{-1}$	Error tipus ($S\beta_j$)	T	p
Ord. Origen	272,14	0,005555556	1,995328843		
X3	8,16	0,008333333	2,443768767	3,33862739	0,001026471
X1X3	-8,62	0,008333333	2,443768767	-3,52822525	0,000533039

$$\hat{Y} = 272,14 + 8,16X_3 - 8,62X_1X_3$$

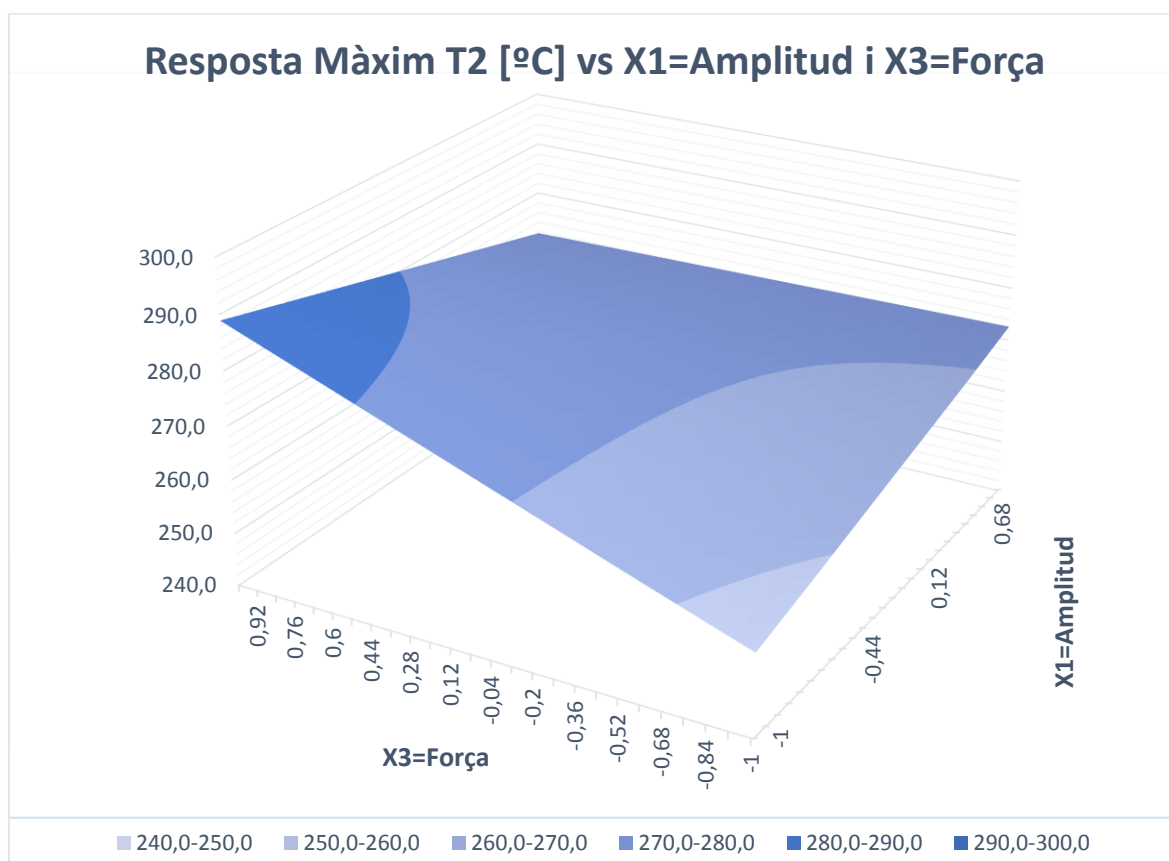


Figura 81: Superfície de resposta

8.7 DoE 7: Influència de la secció d'entrada i de la temperatura del motlle

L'objectiu d'aquest experiment és el d'estudiar si la variació en la secció d'entrada de la peça pot afectar a la dispersió dels valor màxims de temperatura mesurats. Per això, s'han realitzat mesures experimentals en un punt ja prèviament estudiat (per Ultrason), amb la metodologia d'injecció per força, variant la secció d'entrada, i en un altre punt d'un experiment anterior (metodologia d'injecció per velocitat), reduint la secció. A més, s'ha afegit temperatura al motlle als punts d'injecció per força i a un dels injectats per velocitat ($T_{\text{motlle}}=60^{\circ}\text{C}$).

S'ha utilitzat el motlle frame sensoritzat, booster green (1:1), sonotrode de diàmetre 8mm i material PP HOSTACOM PPU X9067HS, MFR=15g/10min. La geometria utilitzada ha sigut la de proveta halteri frame, variant l'entrada entre totalment i parcialment oberta.

Les condicions d'injecció han sigut les següents:

Mètode d'injecció per força								
Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]	Tipus d'entrada	Tmotlle [°C]
13	0,7	1250	200	3	0	0	Oberta-parcialment oberta	60

Mètode d'injecció per velocitat								
Nº pellets	Amplitud [%]	Força [N]	Velocitat [mm/s]	Temps d'ultrasons [s]	Força de compactació [N]	Temps de compactació [s]	Tipus d'entrada	Tmotlle [°C]
13	0,6	3000	3	2,75	0	0	Parcialment oberta	0-60

Els paràmetres experimentals han sigut els següents:

Mètode d'injecció per força				
Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
1	2	2	30	60

Mètode d'injecció per velocitat				
Nº de factors [k]	Nº de nivells [q]	Nº punts diferents [p]	Nº repeticions per punt	Nº total d'experiències [n]
1	2	2	30	60

El primer anàlisi correspon als punts d'injecció per força:

	Promig Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
Entrada oberta	229,05	6,87
Entrada tancada	223,05	6,61

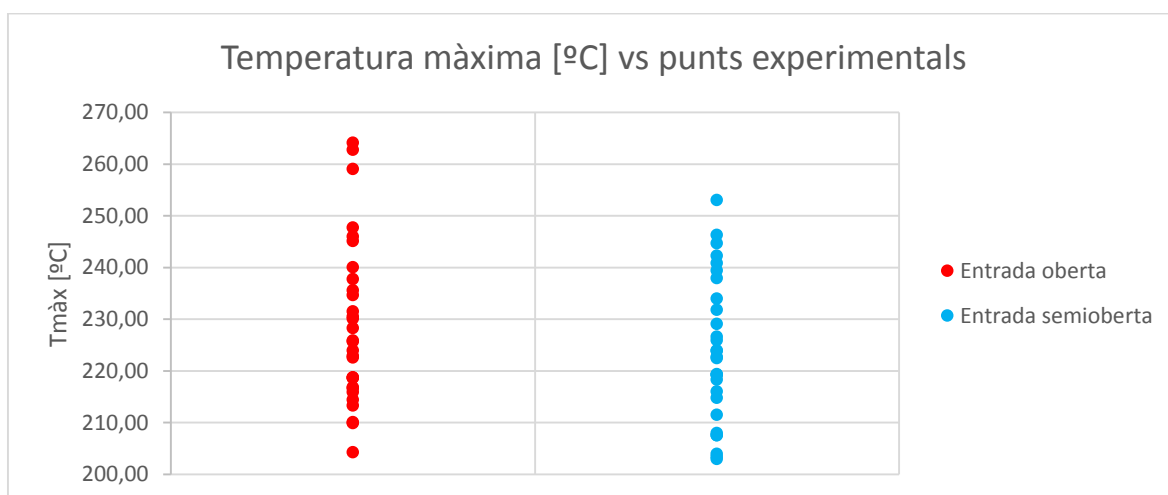


Figura 82: Valors experimentals amb entrada oberta i semioberta

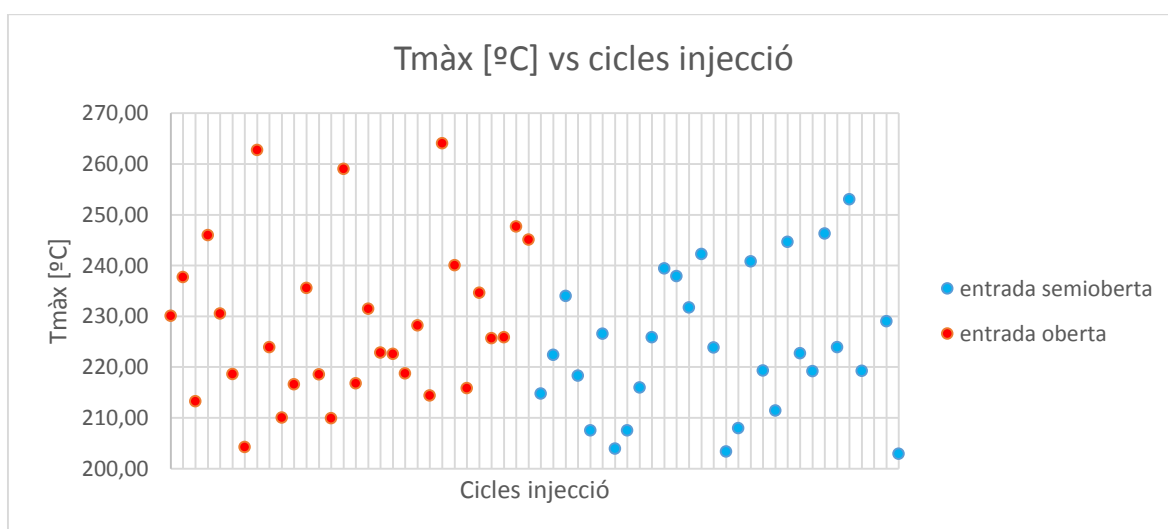


Figura 83: Temperatura màxima a cada cicle d'injecció

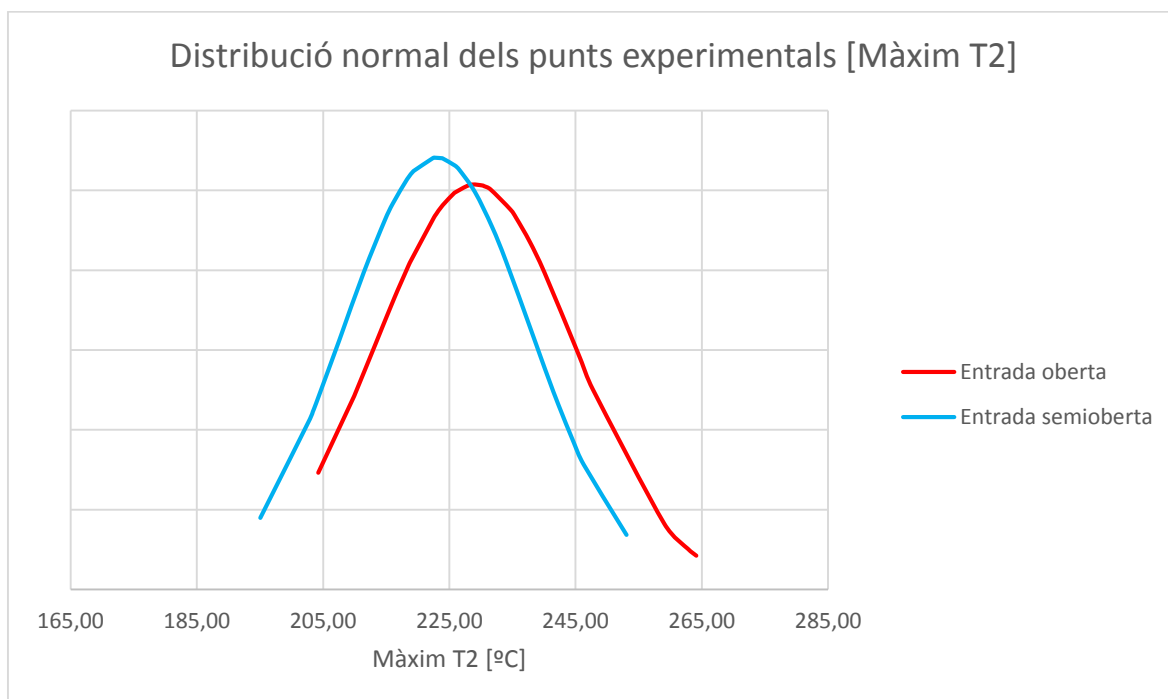


Figura 84: Distribució normal dels punts experimentals

S'observa clarament com el canvi de la secció en l'entrada sembla no tenir cap tipus d'incidència ni en el valor mitjà del màxim de temperatura, ni en la desviació resultant.

Seguidament s'analitzen els punts injectats per velocitat:

	Promig Màxim T2 [°C]	Desv.rel Màxim T2 [%]
Sense Tmotlle	206,58	7,99
Tmotlle=60°C	206,48	6,80

S'observa una lleugera millora en quant al valor de dispersió al punt on s'ha afegit temperatura al motlle, que podria ser degut a diversos factors com estar sotmès a menors esforços de cisalla, o evitar refredament prematur en part del flux. Tot i així, no és una millora massa rellevant.

8.8 Relació màxim temperatura vs. dispersió relativa

En relació al fenomen que s'ha observat en alguns experiments, on de forma genèrica els punts experimentals amb menor dispersió es trobaven en els punt amb màxims de temperatura més baixos, s'ha estudiat aquesta tendència en cada un dels experiments realitzats.

Els resultats obtinguts són els següents:

	Mitjana Màxim T2 [°C]	Desv. Rel Màxim T2 [%]	
MOTLLE ASCAMM	328,00	11,64	DoE 1 Material PP ELTEX blau
	304,38	11,07	
	280,74	8,78	
	231,30	7,84	
	193,09	7,20	
	276,40	8,53	DoE 2 Material PP COPO RANDOM
	248,05	8,03	
	221,16	5,58	
	284,00	11,20	
	258,52	8,47	
	229,80	9,24	
	324,73	12,74	
	263,24	13,93	
	227,64	10,03	
	265,40	8,80	DoE 3 Material PP ELTEX blau
	230,12	5,04	
	212,91	5,24	
	257,68	9,60	
	226,56	7,21	
	206,91	5,06	
MOTLLE FRAME			

	237,91	6,88		
	225,66	7,30		
	225,12	5,29	DoE 4	Material PP ELTEX blau
	228,99	5,84		
	231,67	5,25		
	226,13	6,31	DoE 5	Material PP COPO RANDOM, diferents dimensions
	224,13	7,07		
	194,68	5,98		
	273,58	14,21	DoE 6	Material PP ELTEX blau
	290,59	5,89		
	266,07	12,09		
	271,07	8,08		
	274,51	8,03		
	257,02	8,85		
	229,05	6,87	DoE 7	MATERIAL PP HOSTACOM
	223,05	6,61		
	206,58	7,99	V_ent tancada	Material PP PP HOSTACOM
	206,48	6,80	V_ent tancada Tmold=60°C	

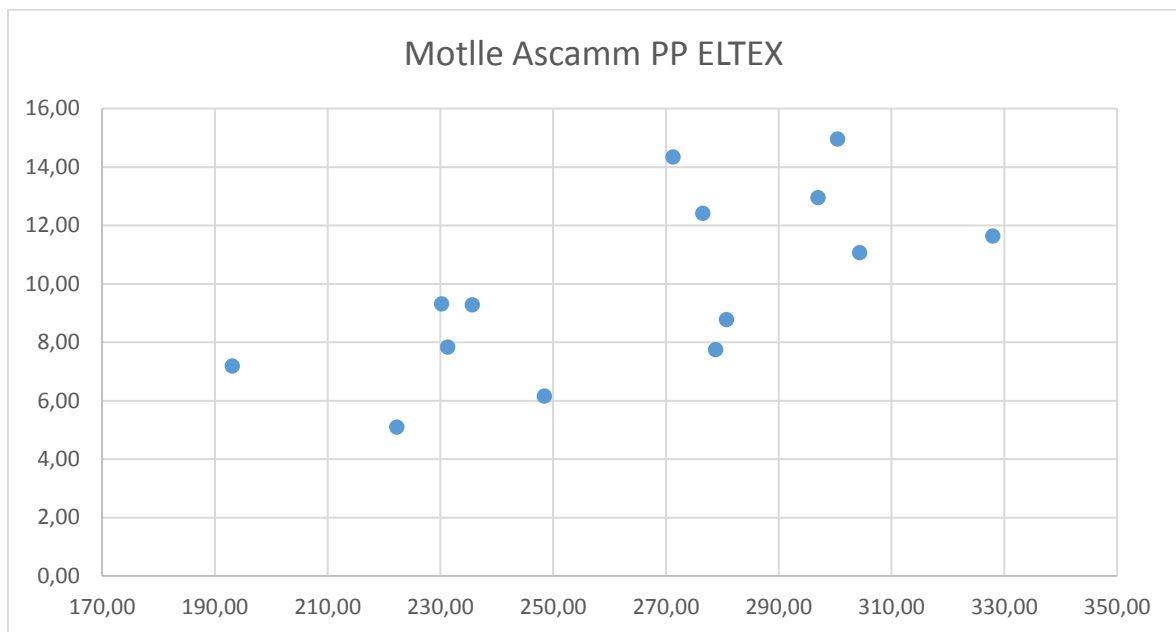


Figura 85: Desviació estàndard relativa a la mitjana del màxim de temperatura

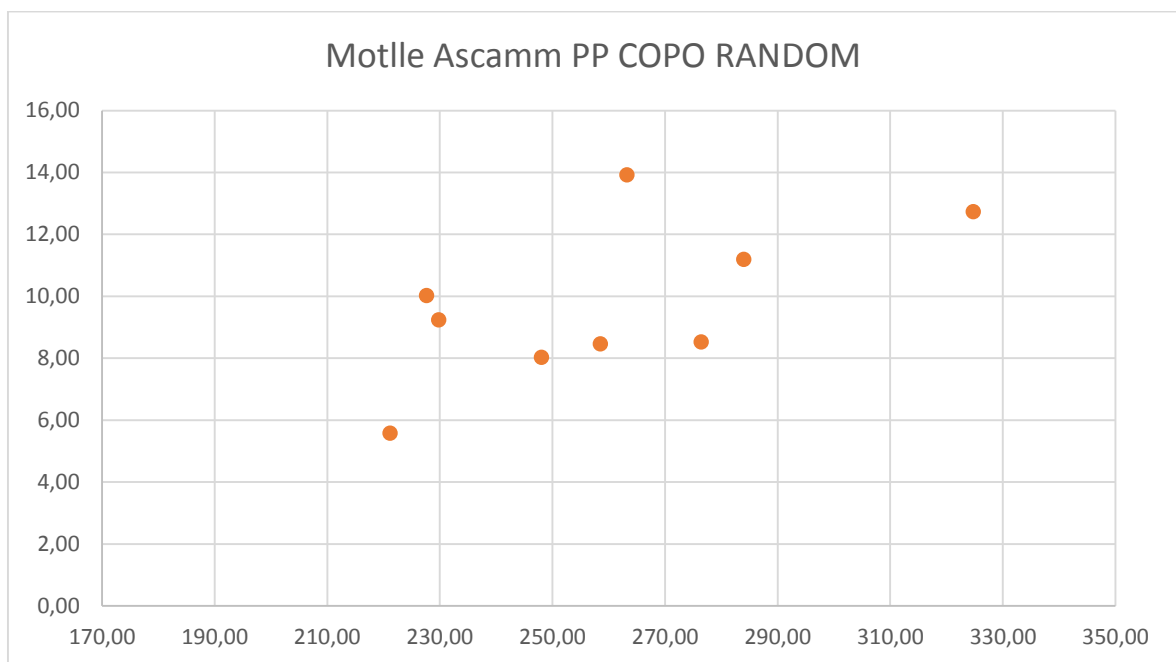


Figura 86: Desviació estàndard relativa a la mitjana del màxim de temperatura

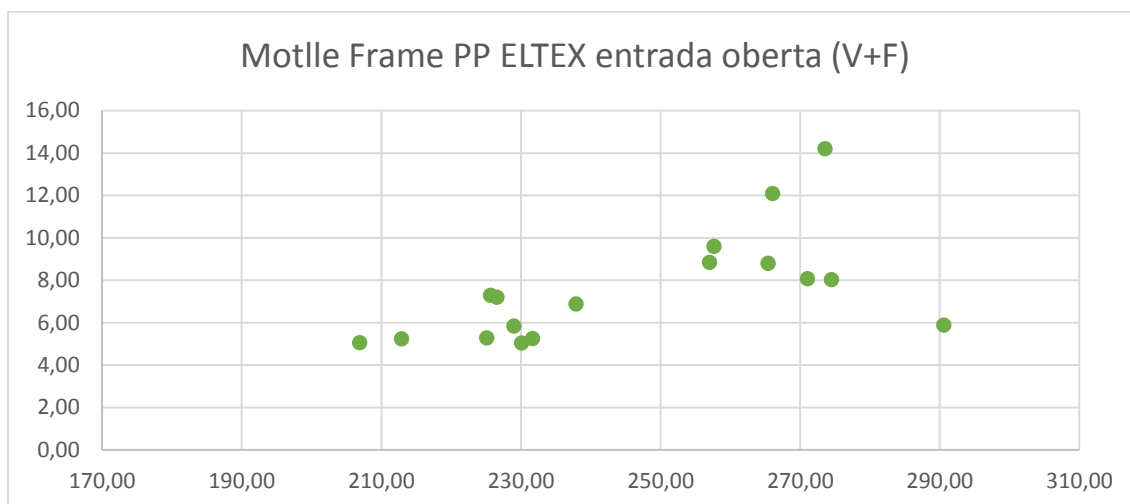


Figura 87: Desviació estàndard relativa a la mitjana del màxim de temperatura

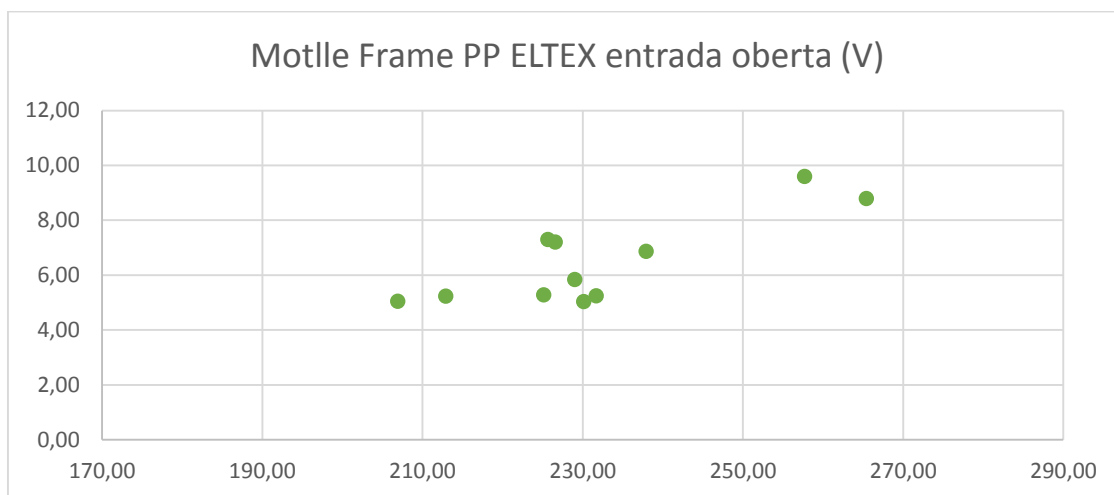


Figura 88: Desviació estàndard relativa a la mitjana del màxim de temperatura

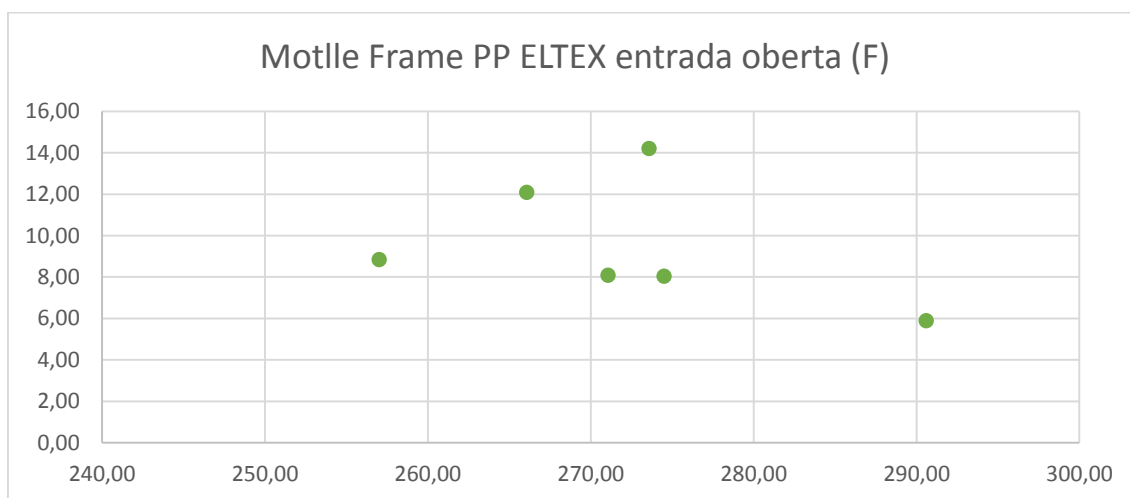


Figura 89: Desviació estàndard relativa a la mitjana del màxim de temperatura

Es pot veure com en alguns casos si que hi ha una tendència en disminuir la desviació estàndar als punts de més baixa temperatura, però no es un fet que es pugui generalitzar ni extrapolar a tots els casos.

9. Conclusions dels experiments

9.1 Conclusions DoE 1

La temperatura mostra una tendència creixent amb el valor d'amplitud de vibració, tant agafant els valors mitjans com els màxims.

Estudiant els dos models obtinguts, la mitjana de la temperatura mostra una dispersió menor i més constant que el màxim, tot i que un ajust normal dels residus lleugerament menor. La dispersió més constant podria estar induïda per la fase de refredament, que és bastant homogènia per tots els cicles, i per tant la variació del valor mitjà entre cicles correspondria només a la diferència entre els pics de temperatura just quan el plàstic fos entra en contacte amb el sensor.

La considerable dispersió observada pot estar produïda per les turbulències del front de flux quan entra amb contacte amb el sensor, ja que el volum de la peça és bastant elevat.

El fet es que el valor de temperatura que ens interessa és aquell que més s'aproximi a la temperatura de la càmera d'injecció, per això ens interessaria el valor de temperatura pròxim al moment del primer contacte amb el sensor, i el punt màxim s'acosta molt més que la mitjana de tot el cicle.

A més, observant els models obtinguts, el model quadràtic del màxim és més fàcil i coherent d'interpretar que el model cúbic del valor mitjà.

En els pròxims experiments es continuaran estudiant ambdues respostes però afegint el factor de control de velocitat, i concretant més la finestra de procés.

9.2 Conclusions DoE 2

S'observa la mateixa tendència creixent de la temperatura respecte l'amplitud, tant en valors màxims com mitjans. Al afegir el factor velocitat, s'ha pogut observar una tendència, tot i que molt lleugera, a disminuir la temperatura al augmentar la velocitat. Això podria ser causat per la disminució del temps d'exposició de la mateixa massa de material a la vibració ultrasònica.

Si que sembla evident que la dispersió de valors és menor en punts de velocitats altes i amplituds baixes. Sembla també tenir relació amb la mitjana de temperatura, obtenint una dispersió més petita, en general, en punts on la temperatura mitjana és més baixa.

En quant a l'estudi del tipus de resposta, sembla ser que el Màxim ens pot donar una informació més útil de la temperatura d'injecció que la Mitjana, tot i que aquest presenta

una major dispersió de valors, la Mitjana podria estar distorsionant aquesta informació al afegir tota la fase de refredament del material, que no és d'interès per aquest estudi.

Per tenir una aproximació de l'increment de temperatura (en màxim) en funció de la magnitud de cada factor, s'han construït les taules següents:

Fixem V [mm/s]	Increment de T per 0,01% d'Amplitud	Increment de T per μm d'Amplitud
3	3,59 °C	3,37 °C
4	2,75 °C	2,46°C
5	1,92 °C	1,55 °C

Fixem A [%]	Increment de T per 0,1 mm/s de Velocitat
0,625	-0,12 °C
0,75	-1,167 °C
0,875	-2,21 °C

Aquestes dades són molt aproximades i només és fiable l'ordre de magnitud, degut a la gran dispersió que es té.

En el pròxim experiment s'estudiaran els mateixos punts d'injecció però amb un polipropilè diferent, amb l'objectiu de veure si les tendències i dispersions són similars en els mateixos punts.

9.3 Conclusions DoE 3

La dispersió ha disminuït considerablement en injectar a una geometria de volum més reduït. Per tant, això podria indicar que als experiments anteriors part de la dispersió era introduïda per la tipologia del flux al entrar en contacte amb el sensor.

S'observa clarament com a amplituds baixes la dispersió de temperatura és menor. En aquest cas, l'efecte de la velocitat no és tan clar, i no es pot extreure cap conclusió determinant. Tot i així, els punts de menor dispersió es troben a velocitats altes i mitges.

Els punts de dispersió més baixos es troben, generalment, amb les mitjanes de temperatura més baixes, tot i que no és extrapolable a la totalitat dels punts estudiats.

Per tenir una aproximació de l'increment de temperatura en funció de la magnitud de cada factor, s'han construït les taules següents (tenir en compte que l'efecte de la velocitat no és gaire clar):

Fixem V [mm/s]	Increment de T per 1% d'Amplitud	Increment de T per μm d'Amplitud
3	0,87 °C	0,93 °C
4	1,13 °C	1,21 °C
5	1,38 °C	1,47 °C

Fixem A [%]	Increment de T per 0,1 mm/s de Velocitat	Increment de T per 10 mm ³ /s de Velocitat
0,6	0,13 °C	0,23 °C
0,8	0,65 °C	1,23 °C
1	1,16 °C	2,2 °C

Per tal de seguir eliminant soroll en les dades, s'intentarà trobar quines possibles causes poden estar introduint dispersió als experiments. En el següent experiment, s'estudiarà si una petita variació de massa en la dosificació (d'un pellet més o menys) pot afectar a la temperatura resultant i a la dispersió de la mateixa.

9.4 Conclusions DoE 4

No s'ha pogut observar cap influència rellevant en la dispersió o bé en el valor de temperatura, al variar lleugerament la massa de dosificació. Si que s'observa un increment clar de la força de la màquina, que es pot corregir commutant a la fase de compactació per límit de força. Per tant, es descarta el possible efecte d'aquest factor, en quan la temperatura, en els següents experiments.

9.5 Conclusions DoE 5

S'ha observat una relació significativa entre el volum de pellets dosificats i la temperatura d'injecció màxima obtinguda, entre punts experimentals amb la mateixa massa dosificada i tipus de material.

S'observa com la temperatura màxima ha disminuït en el punt amb pellets de menor volum, en valor mitjà, més de 30°C respecte als pellets de major volum. La variació en volum entre els dos extrems és de gairebé 1:10. Tot i així, entre el punt central i el màxim, no s'ha

observat una diferència significativa, fet que indicaria una relació no lineal entre el la temperatura obtinguda i el volum de pellet, amb una tendència de tipus logarítmic.

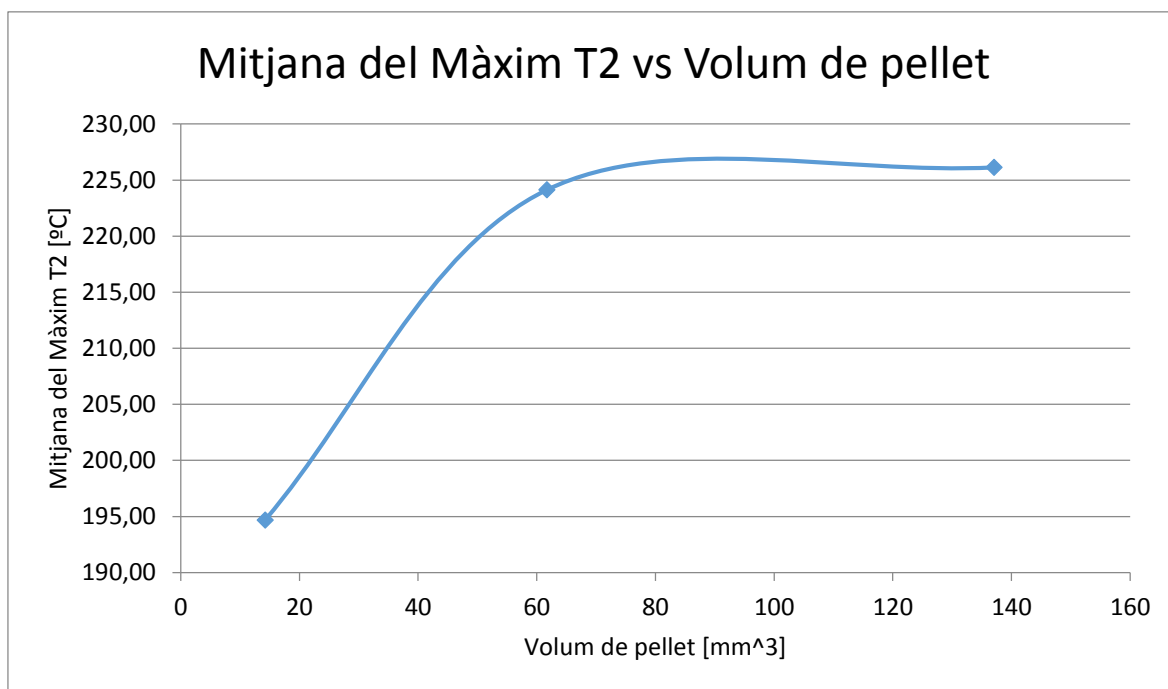


Figura 90: Evolució Màxim Temperatura vs Volum de pellet

9.6 Conclusions DoE 6

No s'observa cap millora respecte al mètode d'injecció per velocitat en quant a les desviacions en la resposta. Els valors de temperatura obtinguts són bastant alts, fet que indicaria degradació al material.

S'observa un augment de temperatura al augmentar la força, segurament degut a l'efecte de cisalla al material.

9.7 Conclusions DoE 7

No s'ha trobat cap incidència rellevant en variar la secció d'entrada a la peça. Si que la dispersió es veu reduïda al utilitzar temperatura en motlle, però la millora no és massa rellevant. Tot i així, podria indicar que reduir el gradient de temperatura entre el sonotrode y el final de la peça comporta a una millora progressiva en la dispersió del valors mesurats.

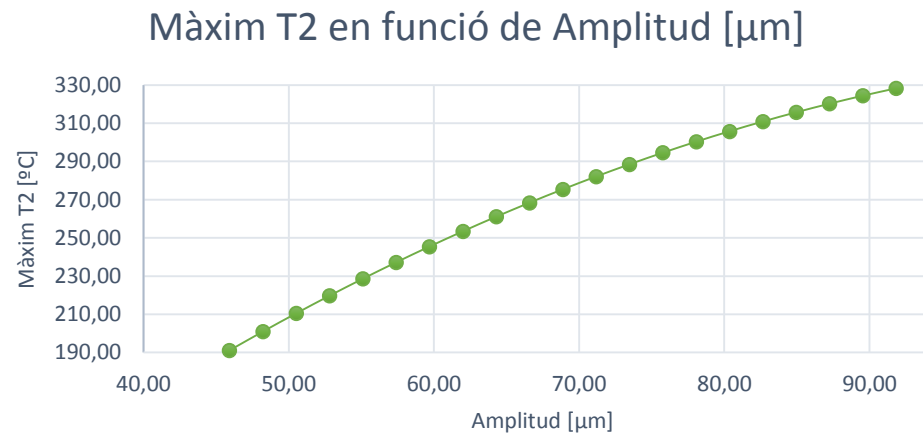
9.8 Taules resum conclusions

	CONCLUSIONS EXPERIMENTS INDIVIDUALS
DOE 1	Temperatura creix en augmentar l'amplitud
	Paràmetre de temperatura a estudiar: Màxim
	Alt nivell de dispersió en les respostes
	Possible dispersió provocada pel flux (volum injectat molt gran)
DOE 2	Temperatura creix en augmentar l'amplitud
	Lleugera tendència en disminuir temperatura al augmentar velocitat
	Dispersió valors menors a amplituds baixes
	Dispersió valors menors a velocitats altes
	En ordre de magnitud i en valor mitjà, la temperatura augmenta uns 2,5 °C per micra d'amplitud, pel PP estudiat
	En ordre de magnitud i valor mitjà, la temperatura disminueix entorn a 1 °C per cada 0,1 mm/s de velocitat, pel PP estudiat
	Alt nivell de dispersió en les respostes
DOE 3	Temperatura creix en augmentar l'amplitud
	La dispersió de resposta disminueix considerablement en reduir el volum injectat, però segueix sent considerable
	Punts de menor dispersió es troben a velocitats mitges i altes i amplituds baixes
	Es torna a observar una tendència de disminució de la dispersió de valors en els punt de menor temperatura, tot i que només de forma genèrica i no en tots els casos
	En ordre de magnitud i en valor mitjà, la temperatura augmenta uns 1,2 °C per micra d'amplitud, pel PP estudiat

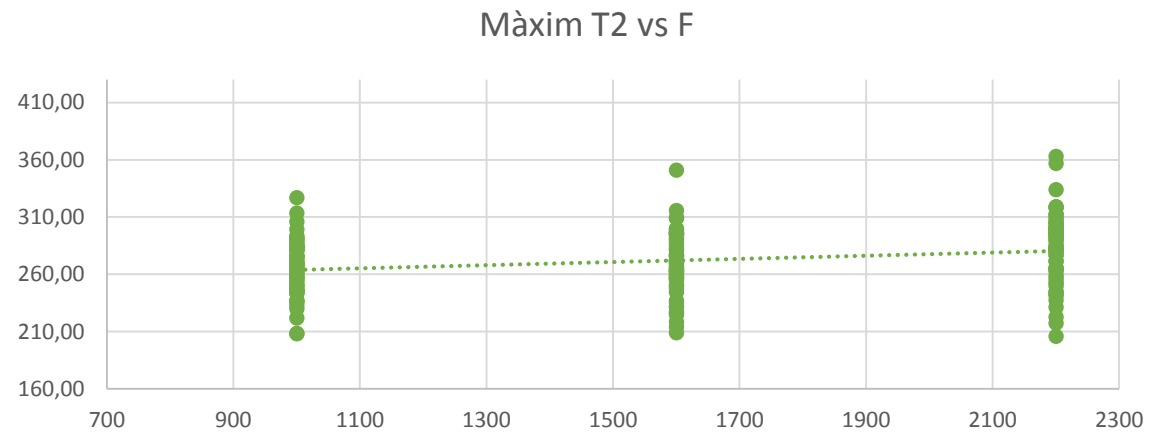
DOE 4	No s'observa cap influència rellevant en quant a la temperatura, al variar la massa de dosificació en un pellet. Si que s'observa com s'incrementa la força de la màquina.
DOE 5	S'observa que al disminuir el volum de pellet, amb la mateixa massa de dosificació, la temperatura obtinguda és més baixa, tenint una diferència de més de 30 °C amb una variació de volum pròxima a 1:10
DOE 6	<p>No s'observa millora en la dispersió de valors al injectar per força</p> <p>Al augmentar la força, augmenta la temperatura resultant, ja que hi ha més cisalla</p>
DOE 7	<p>No s'ha trobat cap incidència rellevant ni al màxim de temperatura ni a la dispersió en variar la secció d'entrada de la peça</p> <p>Al afegir temperatura al motlle, s'obté el mateix valor màxim de temperatura, però disminueix la dispersió. Podria indicar que la dispersió millora en quant el gradient de temperatura que es troba el material és menor, com ja s'havia observat de manera genèrica en algun experiment anterior.</p>

CONCLUSIONS GENERALS

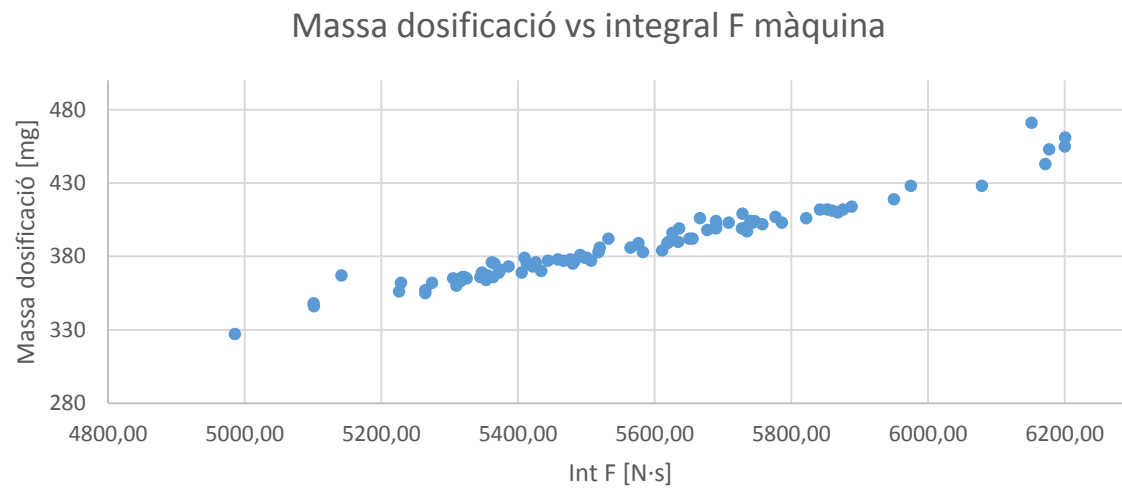
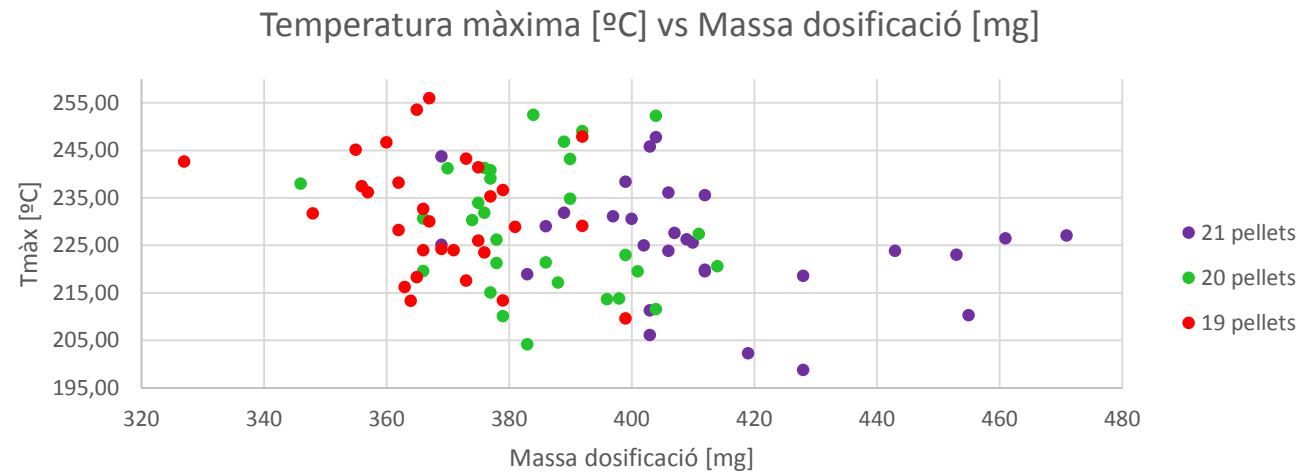
Temperatura creix en augmentar l'amplitud



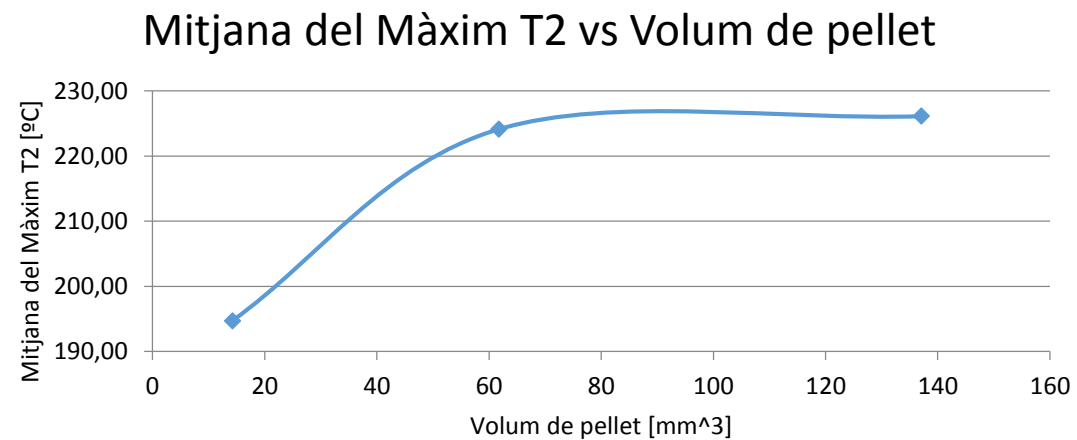
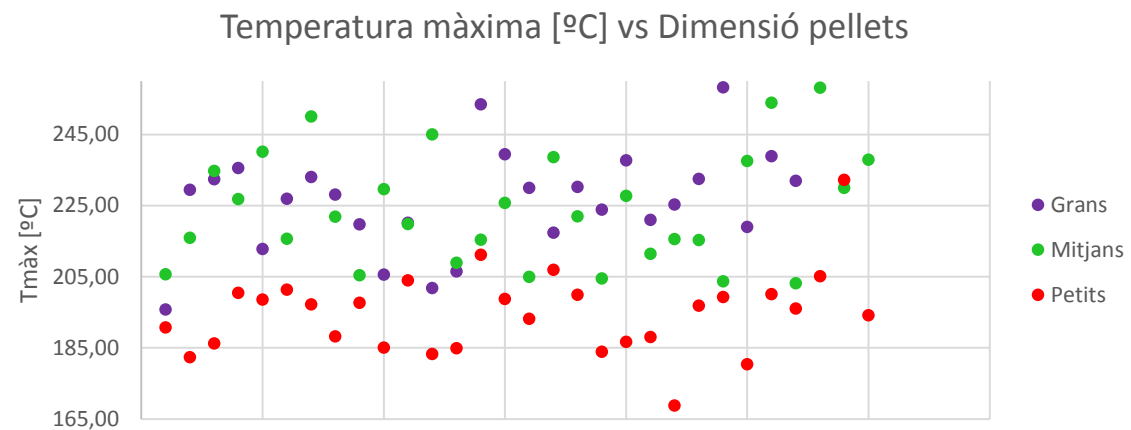
Temperatura creix lleugerament en augmentar la força d'injecció



Petites variació en la massa de dosificació no afecten al valor o a la dispersió de les temperatures, però sí a la força de màquina. Això es pot corregir amb la commutació per força.

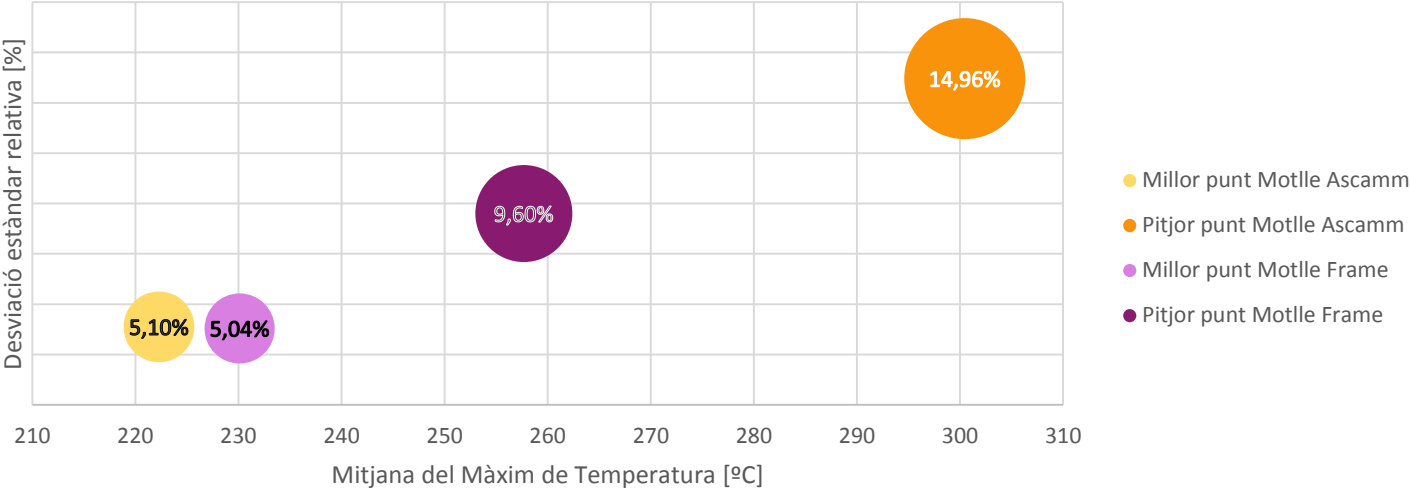


Al disminuir el volum de pellet, amb la mateixa massa de dosificació, la temperatura obtinguda és més baixa, tenint una diferència de més de 30 °C amb una variació de volum pròxima a 1:10

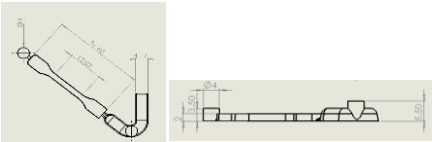


Reducció de la dispersió en les respostes
al disminuir el volum injectat

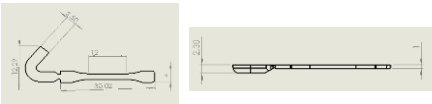
Comparativa punts d'injecció en motlles Ascamm i Frame (PP ELTEX blau)



CONFIGURACIÓ 1	Motlle	Diametre Sonotrode	Volum injectat
	ASCAMM	12 mm	556,38 mm ³

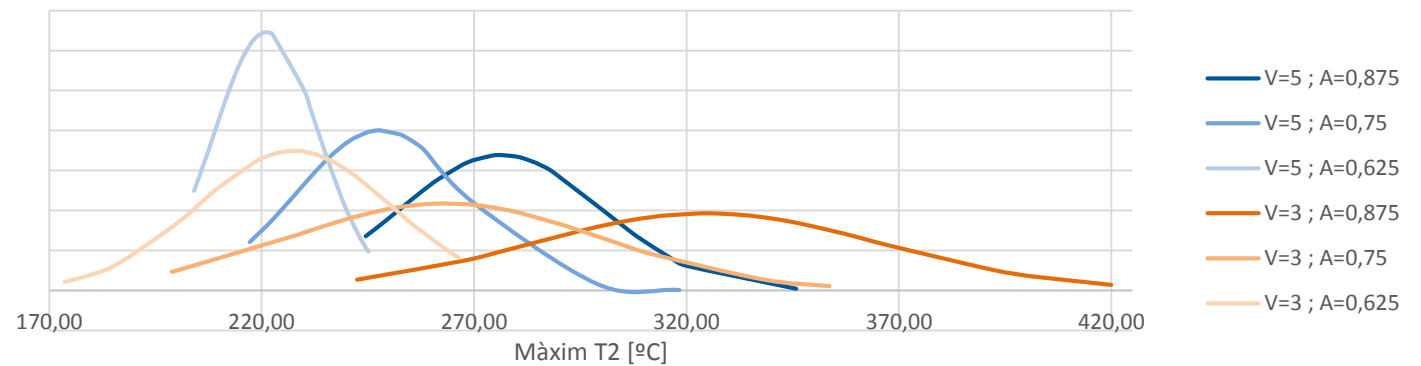


CONFIGURACIÓ 2	Motlle	Diametre Sonotrode	Volum injectat
	FRAME	8 mm	192,65 mm ³

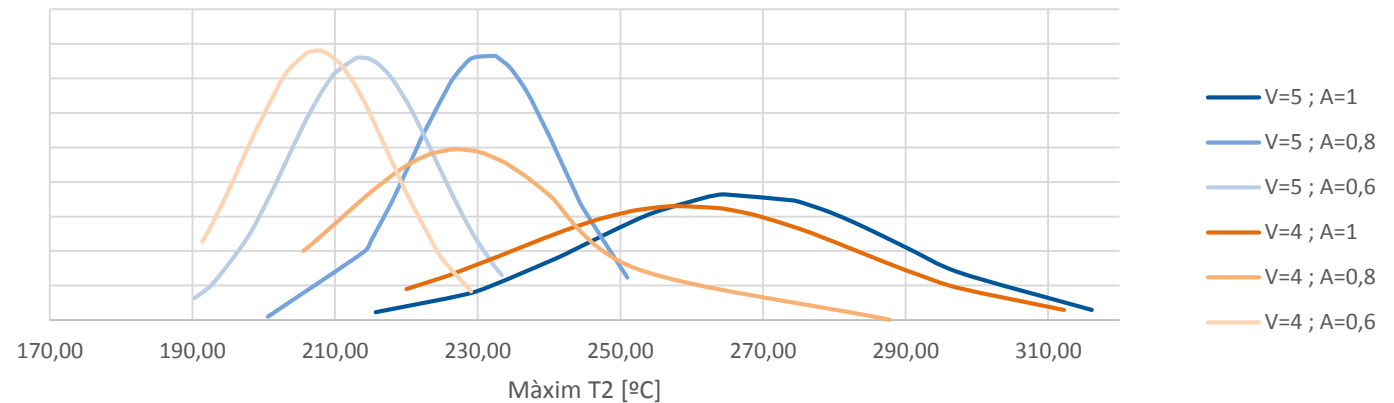


Tendència genèrica en obtenir menor dispersió als punts d'amplituds baixes i velocitats mitges-altes

Distribució normal dels punts experimentals [Màxim T2, motlle Ascamm]

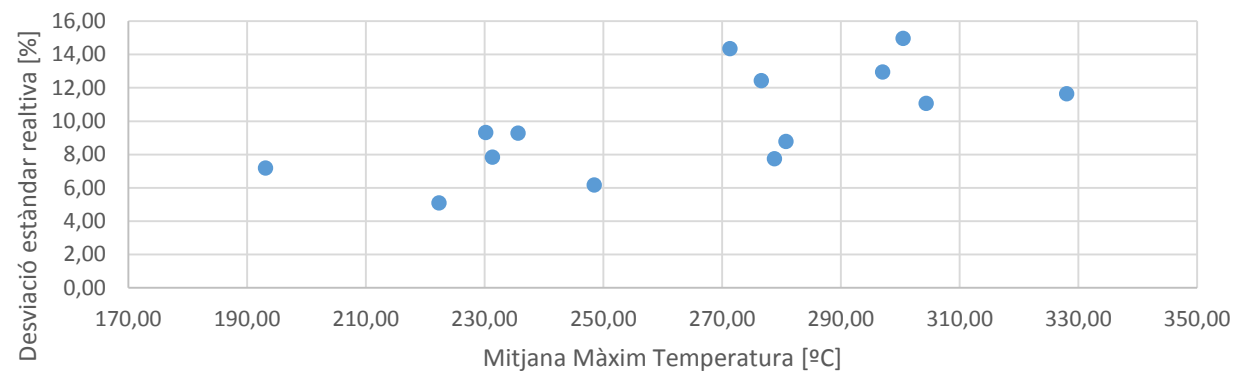


Distribució normal dels punts experimentals [Màxim T2, motlle Frame]

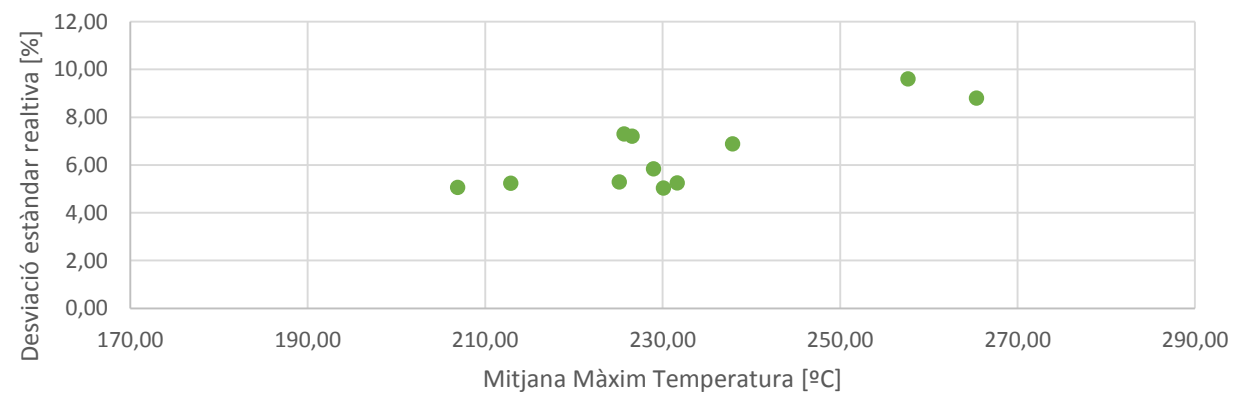


Tendència genèrica en obtenir menys dispersió als punts de temperatura màxima menor. Gradients de temperatura inferiors poden comportar millora en la repetibilitat.

Motlle Ascamm PP ELTEX



Motlle Frame PP ELTEX entrada oberta (V)



10. Propers passos

Els següents passos, que serviran com a continuació d'aquest estudi, aniran dirigits a intentar reduir la dispersió que s'ha obtingut en els diferents experiments realitzats.

Per això, es realitzaran els mateixos experiments al nou model de la Sonorus (S2G), el qual millora el disseny mecànic i augmenta el límit de pressions a les que es pot treballar. També es realitzaran comparacions amb una màquina de microinjecció convencional (babyplast), i s'observaran els avantatges i inconvenients que es tenen.

11. Agraïments

Agrair tota l'ajuda prestada pels diversos departaments d'Eurecat que han col·laborat en aquest projecte, així com a Marcel Janer per dirigir aquest estudi. Agrair el suport tècnic i els consells aportats per part de l'equip d'Ultrason.

Per últim, agrair a Jasmina Casals la codirecció aquest estudi des de la UPC.

12. Bibliografia

- [1] Bernhardt, E. C. J Ind Eng Chem, “Effects of Ultrasound on Thermoplastic Melts” 1954, 46, 742–746.
- [2] Lerch, B. W. US Patent 3071809, 1963.
- [3] Bodine, A. G. US Patent 3169589, 1965.
- [4] Fairbanks, T. H. U.S. Patent 3663668, 1972.
- [5] Panchenko, L. et al. 1973, 39, 210–211.
- [6] Neppiras, E. A., “Acoustic Cavitation”, Phys Rep 1980, 61, 159–251.
- [7] Wu, H.; Bao, W.; Guo, S., “Enhanced Flow Behaviors of Metallocene-Catalyzed Linear Low-Density Polyethylene During Ultrasound-Assisted Extrusion”, Polym Eng Sci 2010, 50, 2229–2235.
- [8] Avila-Orta, C et al. “An Overview of Progress and Current Challenges in Ultrasonic Treatment of Polymer Melts”, Advances in Polymer Technology 2013.
- [9] Brujan, E. A.; Ikeda, T.; Matsumoto, Y., “Dynamics of ultrasound-induced cavitation bubbles in non-Newtonian liquids and near a rigid boundary”, Phys Fluids 2004, 16, 2402.
- [10] “Ultrasonic welding and assembly of engineering plastics”, Ticona GmbH, Kelsterbach, 2004.
- [11] Whiteside B. R. et al., “Micromoulding: process characteristics and product properties”, Plastics, Rubber and Composites Vol. 32 No. 6, IoM Communications, 2003.
- [12] Michaeli W. et al, “Manufacturing of polymer micro parts by ultrasonic plasticization and direct injection”, Microsist Technol 17:243-249, 2011.
- [13] Ultrason market study, 2012.
- [14] Rodríguez Bravo, L. “Microprocesado de matrices termoplásticas mediante ultrasonidos: Evaluación de las propiedades químicas y físicas de los materiales procesados”, PFC UPC-ETSEIB, 2013.
- [15] Sacristan M. et al., “Effects of ultrasonic vibration on the micro-molding processing of polylactide”, Ultrasonics Sonochemistry 21 376-386, 2014.

- [16] Ferrer I. et al., “Study of the ultrasonic molding process parameters for manufacturing polypropylene parts”, *Procedia Engineering* 132 7-14, 2015.
- [17] M. Albareda, I. Algaba, S. Casadesús, M. Pepió, “Apunts Disseny d’Experiments”, ETSEIAT-UPC, 2013.
- [18] Jiang et al., “Ultrasonic plastification speed of polymer and its influencing factors”, *Central South University Press, Springer*, 19:380-383, 2012.
- [19] Puiggali et al., “Micro-molding with ultrasonic vibration energy: New method to disperse nanoclays in polymer matrices”, *Ultrasonics Sonochemistry* 21 1557-1569, 2014.
- [20] Puiggali et al., “Effects of ultrasonic vibration on the micro-molding processing of polylactide”, *Ultrasonics Sonochemistry* 21 376-386, 2014.
- [21] Sato et al., “Study of Application of Ultrasonic Wave to Injection Molding”, *Yamagata* 992-8510, 2009.
- [22] Wu et al., “Characteristics and mechanisms of polymer interfacial friction heating in ultrasonic plasticization for micro injection molding”, *Microsyst Technol*, Springer, 2016.